

# **Automatisierte Auslegung von Extrusionswerkzeugen**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und  
Verfahrenstechnik der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Kenny Saul

aus

Oberhausen

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg

Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Walter Michaeli

Tag der mündlichen Prüfung: 10.10.2011



## **Vorwort / Dankadresse**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktion und Kunststoffmaschinen an der Universität Duisburg-Essen von 2007 bis 2011. Die Inhalte dieser Arbeit wurden im Rahmen öffentlich geförderter Forschungsvorhaben erarbeitet, daher gilt ein großer Dank der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) sowie dem europäischen Fond für regionale Entwicklung und dem Land NRW (EFRE-CheK).

Mein höchster Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Wortberg, der mich nicht nur in fachlicher Hinsicht jederzeit hervorragend unterstützt und gefördert hat, sondern mir auch in sonstigen Angelegenheiten jederzeit als wertvoller Ansprechpartner zur Verfügung stand. Weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. W. Michaeli für die Übernahme des Koreferats sowie die vielen wertvollen Kommentare.

Ein besonderer Dank geht an meine Frau Sarina, die mir in den letzten Jahren stets außerordentlichen Rückhalt gegeben hat. Ich bedanke mich ferner bei meinen Eltern, Schwiegereltern, Großeltern sowie meinem Bruder Dennis und dessen Frau Annica, die mit mir gemeinsam private Ziele verfolgt und dadurch zu einer großen Entlastung verholfen haben.

Großer Dank gilt meinen Kollegen, die mir stets eine sehr gute fachliche und emotionale Stütze waren. Insbesondere möchte ich an dieser Stelle meinem Bürokollegen Martin Spitz danken, der mir für unzählige Diskussionen zur Verfügung stand. Ebenfalls ein großer Dank gilt Jens Dörner für die unermüdliche Korrekturunterstützung. Meinem guten Freund Nico Petry danke ich für die vielen kritischen Kommentare und die langen fachlichen Diskussionen.

Für die hervorragende Unterstützung danke ich weiterhin Herrn Prof. Dr.-Math. P. Köhler, Oliver te Heesen, Uwe Klemme und Marcin Humpa sowie allen beteiligten studentischen Hilfskräften. Abschließend danke ich den beteiligten Projektpartnern der ETA Kunststofftechnologie GmbH (insbesondere Herrn G. Burmann und Herrn R. Michels) sowie der W. Eubel GmbH & Co. KG.



# Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1	Motivation .....	2
1.2	Zielsetzung.....	3
1.3	Struktur der Arbeit.....	4
2.	Stand der Technik	6
2.1	Extrusion .....	6
2.1.1	Extrusionswerkzeuge.....	7
2.1.2	Verteilerwerkzeuge .....	9
2.2	Primärverteiler.....	10
2.3	Sekundärverteiler .....	13
2.3.1	Funktionsprinzip, Anforderungen.....	14
2.3.2	Auslegung der Geometrie .....	16
2.3.3	Automatisierung der Auslegungsprozesses.....	20
2.4	Virtuelle Produktentwicklung (CAD) .....	22
2.4.1	Auswahl der Konstruktionsart .....	22
2.4.2	Rechnergestütztes Konstruieren .....	23
2.5	Fluidmechanik und Strömungssimulation (CFD) .....	24
2.5.1	Fluiddaten zur Berechnung .....	25
2.5.2	Grundgleichungen der Strömungssimulation.....	29
2.5.3	CFD-Einstellungen (Pre- und Postprocessing) .....	30
2.6	Optimierung.....	31
2.6.1	Lokale Optimierungsmethoden.....	34
2.6.2	Globale Optimierungsmethoden.....	35
2.6.3	Hybride Methoden .....	36
2.6.4	Black-Box Optimierungsproblem.....	36
2.6.5	Differential Evolution .....	38
3.	Vorarbeiten zur Automatisierung	39
3.1	Manuelle CFD-basierte Optimierungsstudie.....	40
3.2	Ableiten von Auswertemethoden.....	45
3.3	Verifizierung der Auswertemethoden .....	52

4.	Automatisierte Auslegung von Extrusionswerkzeugen	58
4.1	Struktur der Automatisierungsroutine .....	58
4.2	Geometriemodell.....	60
4.3	Design-Variablen.....	69
4.4	Wahl des Optimierungsalgorithmus .....	71
4.5	Automatisierung der CFD-Simulation .....	72
4.6	Automatisierte Ergebnisinterpretation.....	76
4.7	Betriebspunktunabhängigkeit.....	81
4.8	Definition des Auslegungskriteriums (DQC).....	84
4.9	Wahl der Gewichtungsparemeter.....	85
4.10	Verifizierung und Validierung .....	87
4.11	Ergebnisdiskussion und Erweiterungspotential.....	104
5.	Zusammenfassung und Fazit	111
5.1	Ausblick.....	113
5.2	Summary.....	115
6.	Literaturverzeichnis	117
7.	Eingesetzte Hard- und Software	132
8.	Curriculum Vitae	135

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Modell einer Rohrextusionslinie .....	7
Abbildung 2.2: Klassifizierung von Extrusionswerkzeugen .....	8
Abbildung 2.3: Unterteilung der KRW-Werkzeuge nach [Mic03] .....	8
Abbildung 2.4: Grundaufbau Wendelverteiler nach [Mic03], [Joh04].....	10
Abbildung 2.5: Prinzipdarstellung – Stern, $2^n$ , längenbalanciert .....	11
Abbildung 2.6: verschiedene Vorverteilungen [Bur06] .....	13
Abbildung 2.7: Prinzipdarstellung eines Wendelverteilers nach [Cre08] .....	15
Abbildung 2.8: Geometrieparameter am Wendelverteiler nach [Cre08] .....	17
Abbildung 2.9: Viskositätskurve .....	26
Abbildung 2.10: Gemessene Viskositätsdaten von Kunststoffen .....	27
Abbildung 2.11: Übersicht Optimierungsverfahren nach [Ber11] .....	32
Abbildung 2.12: Optimierungsfunktion - lokale und globale Extrema.....	34
Abbildung 3.1: Manuelle Geometrieoptimierung .....	39
Abbildung 3.2: Werkzeugkonzept manuelle Optimierungsstudie .....	42
Abbildung 3.3: Kontur- & Vektorplot der Geschwindigk. (qualitat. Vgl.).....	42
Abbildung 3.4: Finales Geometriekonzept .....	43
Abbildung 3.5: Kontur- und Vektorplot der Geschwindigk. (qualitat. Vgl.) .....	44
Abbildung 3.6: Explosionsansicht des Versuchswerkzeuges .....	44
Abbildung 3.7: Darstellung eines virtuellen Dickenprofils.....	46
Abbildung 3.8: Überlappung von Schmelzefronten.....	47
Abbildung 3.9: Verlauf der Pfadlinien.....	48
Abbildung 3.10: Konturplot der Wandschubspannungen (qualitat. Vgl.).....	49
Abbildung 3.11: Visualisierung der Bindenahtgestaltung.....	50
Abbildung 3.12: Verweilzeit unterschiedlicher Pfadlinien.....	51
Abbildung 3.13: Prototyp – Versuchswerkzeug.....	53
Abbildung 3.14: Druckverlustvergleich Simulation – Experiment .....	54
Abbildung 3.15: Probekörper zur Ermittlung des Überlappungswinkels.....	55
Abbildung 3.16: Überlappungswinkelvergleich Simulation–Experiment.....	55
Abbildung 3.17: Ausbaumuster – Simulation Schubsp. (qualitat Vgl.) .....	56
Abbildung 3.18: Versuchsauswertung - Schnitt durch das Ausbaumuster .....	57
Abbildung 3.19: Simulationsvergleich – Schnitt durch das Ausbaumuster.....	57

Abbildung 4.1: Struktur der Programmsteuerung .....	59
Abbildung 4.2: Struktur der Automatisierung .....	60
Abbildung 4.3: Modellierungsstrategie des Versuchswerkzeuges .....	62
Abbildung 4.4: Kontur des virtuellen Schaftfräasers .....	63
Abbildung 4.5: Bahnlinie für den virtuellen Schaftfräser .....	63
Abbildung 4.6: Gesteuerte Kontur der Wendeltiefe .....	64
Abbildung 4.7: Modellierung der Dichtflächen und des Überstromspaltes .....	65
Abbildung 4.8: CAD-basierte Auswerteflächen im Fluidvolumen .....	67
Abbildung 4.9: Verschiedene Wendelverteilerkonfigurationen .....	68
Abbildung 4.10: Variantenmodell Wendelverteilerwerkzeug .....	68
Abbildung 4.11: mögliche Kurvenformen für Spaltweite und Kanaltiefe .....	69
Abbildung 4.12: Hybride Diskretisierung mit Boundary Layern .....	73
Abbildung 4.13: Unstrukturiertes Tetraeder-Netz .....	74
Abbildung 4.14: Einstellung im Sub-System CFD .....	76
Abbildung 4.15: Pfadliniendarstellung zweier Wendeln .....	80
Abbildung 4.16: Viskositätskurven virtueller Materialien .....	83
Abbildung 4.17: Zeitbedarf des Automatismus .....	89
Abbildung 4.18: Versuch 1 & 2 – Druckverlust .....	91
Abbildung 4.19: Wendeltiefenverlauf 3 - Spaltweitenverlauf 1 .....	92
Abbildung 4.20: Wendeltiefenverlauf 1 - Spaltweitenverlauf 3 .....	92
Abbildung 4.21: Wendeltiefenverlauf 3 - Spaltweitenverlauf 3 .....	92
Abbildung 4.22: Versuch 1 & 2 – Überlappungswinkel .....	93
Abbildung 4.23: Wendeltiefenverlauf 2 - Spaltweitenverlauf 2 .....	93
Abbildung 4.24: Auswertung Versuch 3 - Überlappungswinkel .....	94
Abbildung 4.25: Gegenüberstellung verschiedener Zielfunktionen .....	95
Abbildung 4.26: Verlauf der Optimierung .....	100
Abbildung 4.27: Optimierungsergebnis .....	101
Abbildung 4.28: Überlappungswinkel CFD-Simulation .....	101
Abbildung 4.29: Wandschubspannungen CFD-Auswertung .....	102
Abbildung 4.30: Druckverlust - CFD-Auswertung .....	103
Abbildung 4.31: Kurvenverläufe trigonometrische Formulierung .....	106
Abbildung 4.32: Lineare und trigonometrische Winkelauswertung .....	108
Abbildung 4.33: Lineare und trig. Druckverlustauswertung .....	109
Abbildung 4.34: Summenfunktion trig. und lin. Verläufe .....	110



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Überblick Extrusionswerkzeuge nach [Mic03] .....	9
Tabelle 2.2: Überblick Primärverteiler [Bur04], [Bur10], [FiM06] .....	12
Tabelle 2.3: Produktbezogene Forderung – Schmelzeströmung .....	16
Tabelle 2.4: Dreidimensionale Produktbeschreibung nach [Lup09] .....	23
Tabelle 4.1: Gewichtungsparmeter und Auswirkung.....	85
Tabelle 4.2: Versuche zur Verifizierung .....	90
Tabelle 4.3: Werkzeuggeometrie - Druckverlust, Überlappungswinkel .....	96
Tabelle 4.4: Korrelationsanalyse des Optimierers .....	98
Tabelle 4.5: Parametrierung verschiedener Verläufe .....	106
Tabelle 4.6: Parametrierung der trigonom. Zielfunktionen .....	107

## Formelverzeichnis

Formel 2.1: Druckverlust in einem runden Kanal (Hagen-Poiseuille) .....	12
Formel 2.2: Dynamische Viskosität.....	26
Formel 2.3: Carreau-Ansatz inkl. Temperaturverschiebungsfaktor .....	28
Formel 2.4: Gewichtete Summenmethode .....	38
Formel 4.1: Unabhängige Variablen der Optimierungsfunktion.....	71
Formel 4.2: Optimierungsfunktion als gewichtete Summenfunktion .....	71
Formel 4.3: Nebenbedingung zur gewichteten Summenmethode .....	71
Formel 4.4: Stagnationszonen und Schmelzebruchindikation.....	77
Formel 4.5: Kennwert für Spülbarkeit .....	78
Formel 4.6: Kennwert des Druckverlustes.....	78
Formel 4.7: Kennwert der Wanddickenverteilung .....	79
Formel 4.8: Kennwert der Verteilwirkung .....	79
Formel 4.9: Formulierung des DQC ohne Betriebspunktunabhängigkeit .....	81
Formel 4.10: Kennwert der Betriebspunktunabhängigkeit .....	83
Formel 4.11: Verteilwirkung – Betriebspunkt.....	84
Formel 4.12: Wanddickenverteilung - Betriebspunkt.....	84
Formel 4.13: Formulierung des Werkzeugqualitätskriteriums (DQC).....	84
Formel 4.14: Trigonometrische Formulierung der Qualitätskennwerte.....	105
Formel 4.15: Vereinfachte Summenformulierung Lin. vs. Trig. ....	109

## Abkürzungen

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BREP	Boundary Representation
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CFD	Computational Fluid Dynamics
CSG	Constructive Solid Geometry
CheK	Chemie und Kunststoff – Förderprogramm des Landes NRW
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DQC	Die Quality Criterion
FEM	Finite Elemente Methode
FVM	Finite Volumen Methode
GMK	Geometric Modelling Kernel
GUI	Graphical User Interface
HDPE	High Density Polyethylene
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
KRW	Kreisringwerkzeug
LDPE	Low Density Polyethylene
LLDPE	Linear Low Density Polyethylene
NSG	Navier Stokes Gleichungen
PE	Polyethylen
PFW	Profilwerkzeug
PP	Polypropylen
qualitat. Vgl.	qualitativer Vergleich – keine skalare Auswertung
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
WLF	Williams Landel & Ferry

**Verwendete Anglizismen**

Mesher	Software zur Diskretisierung einer Geometrie (Gittergenerator)
Meshing	Generierung eines Berechnungsnetzes
Preprozessor	Software zur Definition strömungsbeschreibender Parameter
Preprocessing	Definition strömungsbeschreibender Parameter
Postprozessor	Software zur Auswertung der Strömungssimulation
Postprocessing	Auswertung der Strömungssimulation
Solver	Software zur Lösung von CFD-Simulationen
Solving	Lösen von CFD-Gleichungen
Boundary Layer	Randschichten bei der Vernetzung

## Formelzeichen

$\alpha_T$	[-]	Temperaturverschiebungsfaktor
$a$	[-]	Gewichtungsfaktor
$A$	[Pas]	Nullviskosität
$B$	[s]	Reziproke Übergangsgeschwindigkeit
$C$	[-]	Steigung Carreau-Ansatz
$D$	[m]	Durchmesser
$H$	[mm]	Wendelkanaltiefe
$H_B$	[mm]	Bauhöhe
$i$	[-]	Indizes, Zählvariable
$L$	[m]	Länge, Bauhöhe
$l$	[mm]	Länge
$M$	[-]	Zählvariable
$m$	[-]	Fließexponent
$m$	[-]	Zählvariable
$\dot{m}$	[kg/h]	Massenstrom
$n$	[-]	Zählvariable
$p$	[Pa]	Druck
$p_{max}$	[Pa]	Maximaldruck
$p_{krit}$	[Pa]	Kritischer Druck
$\Delta p$	[Pa]	Druckverlust
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\varphi_{max}$	[°]	Maximalwinkel
$\varphi_{max,1}$	[°]	Maximalwinkel Wendel 1
$\varphi_{min,2}$	[°]	Minimalwinkel Wendel 2
$R$	[m]	Radius
$S$	[mm]	Spaltweite
$\tau$	[Pa]	Schubspannung
$\tau_{min}$	[Pa]	Minimal-Schubspannung
$\tau_{max}$	[Pa]	Maximal-Schubspannung
$\tau_{krit,min}$	[Pa]	Kritische Minimal-Schubspannung
$\tau_{krit,max}$	[Pa]	Kritische Maximal-Schubspannung
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /s]	Volumenstrom
$v_{min}$	[mm/s]	Minimalgeschwindigkeit
$v_{max}$	[mm/s]	Maximalgeschwindigkeit
$W_K$	[-]	Kurvenform Wendeltiefenverlauf
$W_F$	[-]	Faktor Wendeltiefenverlauf
$S_K$	[-]	Kurvenform Spaltweitenverlauf
$S_F$	[-]	Faktor Spaltweitenverlauf
$S_{Fa}$	[-]	Faktor Spaltweitenverlauf

$S_{Fo}$	[-]	Kurvenform Spaltweitenverlauf
$W_{Fa}$	[-]	Faktor Wendeltiefenverlauf
$W_{Fo}$	[-]	Kurvenform Wendeltiefenverlauf
$Z_{BP}$	[-]	Kennwert der Betriebspunktunabhängigkeit
$Z_{dv}$	[-]	Kennwert der Wanddickenverteilung
$Z_{dTau1}$	[-]	Indikator für Stagnation und Schmelzebruch
$Z_{dTau2}$	[-]	Kennwert für die Spülbarkeit
$Z_{dP}$	[-]	Kennwert für den Druckverlust
$Z_W$	[-]	Kennwert für den Überlappungswinkel
$\eta$	[Pas]	Viskosität
$\bar{\eta}$	[Pas]	Repräsentative Viskosität
$\dot{\gamma}$	[1/s]	Schergeschwindigkeit
$x$	[-]	Unabhängige Variable
$f(x)$	[-]	Abhängige Variable
$a, b, c, d, e$	[-]	Parameter trigonom. Funktion
$x, y, z$	[-]	Kartesische Raumrichtungen
$BP, W; BP, v$	[-]	Indizes Betriebspkt. Winkel, Geschwindigkeit
$\tau, \Delta p, \Delta v, BP$	[-]	Indizes Qualitätskriterien
$lin., trig.$	[-]	Indizes lineare bzw. trigonometrische Form
$Z$	[-]	Qualitätskriterium
1, 2, 3	[-]	Indizes

## 1. Einleitung

Die Kunststoffindustrie besteht aus Kunststoffherzeugern, -verarbeitern und -maschinenbauern. Mit einem Umsatz von 95 Mrd. Euro und etwa 415.000 Beschäftigten in 7.100 Unternehmen ist sie einer der wichtigsten Wirtschaftszweige in Deutschland. Sie liefert mit einem sechsprozentigen Anteil an der heimischen Industrieproduktion innovative Produkte und Lösungen für weitere wichtige Industriezweige, wie den Fahrzeug- und Maschinenbau, die Verpackungsindustrie, die Elektrotechnik und die Bauindustrie [WVK11].

Der Markt der Kunststoffverarbeitung lässt sich nach der Art des Verarbeitungsverfahrens in Spritzgieß- und Extrusionsbetriebe und weiter nach der Art der hergestellten Produkte (z.B. Folien, Rohre) segmentieren.

Zu ihrer Verarbeitung werden (thermoplastische) Kunststoffe von Umgebungstemperatur auf erhöhtes Temperaturniveau (in der Regel mindestens 180°C) erwärmt, so dass sie vom festen in den schmelzflüssigen und damit verformbaren Zustand übergehen. Das Aufschmelzen des Materials geschieht bei der Extrusion durch die Rotation einer Schnecke innerhalb eines temperierten Zylinders. Die schmelzflüssige Kunststoffmasse wird durch ein Extrusionswerkzeug gedrückt, welches die Schmelze in die gewünschte Produktform (z.B. Rohr, Profil) umformt. In der anschließenden Kühlstrecke wird das Produkt gekühlt, so dass es formstabil wird und zur weiteren Bearbeitung/Lagerung/Transport konfektioniert werden kann.

Dem Extrusionswerkzeug (je nach Produkt auch als Rohrkopf, Blaskopf bezeichnet) kommt eine wesentliche Aufgabe zu: Die vom Extruder bereitgestellte strangförmige Kunststoffschmelze wird durch das Extrusionswerkzeug in die Produktform umgeformt, wobei die spätere Produktqualität (z.B. Wanddickenverteilung, Oberflächenbeschaffenheit, mechanische Eigenschaften) stark durch das Werkzeug beeinflusst wird. Die Dimensionierung und Auslegung solcher Werkzeuge ist ein anspruchsvoller Prozess, der stark auf Erfahrungswissen basiert, in der Regel vollständig manuell durchgeführt wird und häufig einen Kompromiss als Ergebnis hat [Vla10].

Seit der Einführung voll parametrischer, assoziativer 3D-CAD-Systeme (Computer Aided Design) werden Schmelzeverteilsysteme zunehmend computergestützt dimensioniert und konstruiert, so dass Variantenkonstruktionen ableitbar sind und Optimierungen einfacher als zuvor realisiert werden können.

Mit dem Aufkommen hochleistungsfähiger Computersysteme etablieren sich zunehmend numerische Simulationssysteme auf Basis der finiten Volumen (FV), finiten Differenzen (FD) oder finiten Elemente (FE) Methode. Diese Softwaresysteme erlauben die Simulation von Fluidströmungen (Computational Fluid Dynamics - CFD) oder des Bauteilverhaltens auf der Basis weniger Randbedingungen zur Charakterisierung des Systems. Als Ausgangsdatensatz wird dabei eine dreidimensionale Werkzeuggeometrie benötigt, welche durch die Nutzung aktueller CAD-Systeme bereits vorliegt.

## 1.1 Motivation

Die Auslegung von Extrusionswerkzeugen geschieht in iterativer Vorgehensweise. Es wird eine Startkonfiguration generiert und hinsichtlich der zu erreichenden Produktqualität ausgewertet. Nach der Interpretation des Ergebnisses wird die Startkonfiguration durch Variation und erneute Auswertung schrittweise verbessert, bis die zuvor definierten Zielkriterien erfüllt werden können. Diese iterative Vorgehensweise ist bei der Auslegung von Schmelzeverteilsystemen sehr zeit- und damit kostenintensiv, da ein erfahrener Ingenieur das System konfigurieren, berechnen, auswerten und aus diesen Daten weiterführende Designvorschläge ableiten muss.

Zur schnellen Änderung des Designvorschlages muss ein robustes dreidimensionales CAD-Modell des Optimierungsobjektes vorliegen. Die wesentlichen Stellgrößen zur Variation des Designvorschlages sollten in Form von veröffentlichten Parametern vorliegen.

Der Designvorschlag wird anschließend für die numerische Berechnung der Strömungssituation vorbereitet. Dazu ist eine Diskretisierung des Fluidvolumens in



ein finite Volumen Netz sowie das Aufprägen von Randbedingungen notwendig. Die korrekte Definition der Solvereinstellungen<sup>1</sup> beschleunigt die Lösungsstrategie. Nach der Berechnung der Ergebnisse liegen diese in Form von skalaren Werten, zugeordnet zu jedem finiten Volumen vor. Zur Auswertung lassen sich auf Basis dieser Werte im Postprozessor verschiedene Darstellungen aufrufen (z.B. Konturplots, XY-Plots, Pfadlinien, etc.), die dem Anwender die Möglichkeit geben, das Ergebnis zu interpretieren. Eine solche optische Auswertung muss im Falle einer automatisierten Optimierung vollständig durch einen implementierten Auswertalgorithmus substituiert werden, in dem das Erfahrungswissen des CFD-Ingenieurs berücksichtigt wird.

Auf Basis der Auswertung werden Geometrievariationen vorgenommen, die iterativ wiederholt werden, bis die gewünschte Ergebnisqualität erreicht ist.

Da bislang keine durchgängige Softwaresystemlösung am Markt verfügbar ist, die sämtliche dazu notwendigen Fähigkeiten in sich vereint, müssen die verschiedenen Stationen auf unterschiedliche Softwaresysteme aufgeteilt werden. Der Gesamtablauf muss dabei durch ein übergeordnetes System gesteuert werden. Die Automatisierung dieses Prozesses ist Inhalt der vorliegenden Arbeit.

## 1.2 Zielsetzung

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Implementierung einer vollständig integrativen<sup>2</sup> Lösung zur Optimierung komplexer Kunststoff-Fließkanalsysteme am Beispiel eines Einschicht-Wendelverteilers zur Verarbeitung thermoplastischer Kunststoffe sowie die Auswertung der Werkzeugqualität auf der Basis eines zu formulierenden Werkzeugqualitätskriteriums (Die-Quality-Criterion - DQC). Zur Erreichung des gesetzten Ziels werden Teilziele definiert, die sich wie folgt darstellen lassen:

1. Aufbau eines robusten, voll parametrischen und assoziativen 3D-CAD-Modells eines Wendelverteilers. Der Wendelverteiler soll derart parametrisiert sein, dass beliebige Systembaugrößen und Konfigurationen

---

<sup>1</sup> Solver = Softwaresystem zur numerischen Lösung der Differentialgleichungen

<sup>2</sup> integrativ = Verknüpfung verschiedener Anwendungen

durch reine Variation der Parameter ermöglicht werden. Die Variation soll robust gestaltet sein, so dass auch nach einer Parametervariation ein stabiler Neuaufbau der Geometrie erfolgt.

2. Implementierung eines Automatismus zur Durchführung sämtlicher Preprocessing-Schritte. Diese beinhalten das Ableiten des Fluidvolumens aus der Werkzeuggeometrie, die Diskretisierung des Fluidvolumens in ein finite Volumen Netz, das Aufprägen von Randbedingungen, die Definition der Solvereinstellungen sowie den Start des Berechnungsprozesses.
3. Formulierung eines Werkzeugqualitätskriteriums (DQC) zur Auswertung der Qualität des Designvorschlages anhand eines skalaren Wertes, der für eine einkriterielle Optimierung herangezogen werden kann. Die Formulierung dieses DQC soll wesentliche qualitätsbeschreibende Kenngrößen eines Wendelverteilerwerkzeuges beinhalten. Zur Ermittlung dieses Kennwertes wird ein Berechnungsalgorithmus implementiert, der die Ergebnisse der CFD-Simulation ausliest und daraus das DQC berechnet.
4. Umsetzung der genannten Schritte in einem Arbeitsablauf der konsekutiv die einzelnen Prozessschritte aufruft, bearbeitet und die Ergebnisdaten einem weiterführenden Prozessschritt zur Verfügung stellt.
5. Auswahl eines mathematischen Optimierungsalgorithmus für den vorliegenden Optimierungsfall.
6. Verifizierung der Abbildegenauigkeit des Qualitätskennwertes auf der Basis realer Laborversuche sowie Korrelationsanalysen.

### **1.3 Struktur der Arbeit**

Die in der vorliegenden Dissertation entstandenen Forschungsergebnisse sind Inhalt zweier durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderter Forschungsvorhaben sowie eines durch den europäischen Fond für regionale Entwicklung (EFRE) geförderten Forschungsvorhabens.

In den drei genannten Forschungsvorhaben kooperieren der Lehrstuhl für Konstruktion und Kunststoffmaschinen (KKM - Prof. J. Wortberg) sowie der Lehrstuhl für Rechneinsatz in der Konstruktion (CAE - Prof. P. Köhler). Im Rahmen der Forschungsförderung übernimmt die Arbeitsgruppe CAE die Modellbildung und Wissensintegration, der Bereich KKM fokussiert den Aufbau des Optimierungs-Automatismus sowie die automatisierte Durchführung und Auswertung der Simulation.

Im Rahmen des ersten DFG-Forschungsvorhabens (DFG WO-302-34-1 & KO-1620-8-1) wurde ein Automatismus zur automatisierten Optimierung einfacher Strömungskanalgeometrien (90°-Umlenkungen) auf der Basis eines parametrischen 3D-CAD-Modells untersucht und vorgestellt. Wesentliche Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens können [Lup09], [2008a], [2009a], [2009b] entnommen werden und stellen die Ausgangssituation für die folgenden Forschungsarbeiten dar. Weitere spezifische Besonderheiten der CAD-Modellbildung werden darüber hinaus in [KDL08a], [KDL08b], [KDL08c] dargelegt.

Im Rahmen des CheK.NRW Vorhabens (Nr. 280209312) wird eine manuelle Optimierung einer komplexen, prototypischen Extrusionswerkzeuggeometrie vorgenommen. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens werden in Kapitel 3 ausführlich dargelegt und können darüber hinaus den eignen Veröffentlichungen [2010b], [2010c], [2011b], [2011c] entnommen werden.

Auf den Ergebnissen dieser Kooperations-Forschungsvorhaben aufbauend wird im zweiten DFG Kooperations-Vorhaben (DFG WO-302-37-2 & KO-1602-9-2) der einfache Automatismus um die Anforderungen zur Simulation und Auswertung komplexer Wendelverteiler-Werkzeuggeometrien erweitert. Auf der Basis einer Vorauslegung (KKM) wird die Modellbildung der parametrischen und wissensbasierten Geometrie durchgeführt (CAE) und der Automatismus sowie eine automatisierte Ergebnisauswertung implementiert (KKM), siehe Kapitel 4. Bereits zuvor veröffentlichte Details können dazu ergänzend der eigenen Literatur z.B. [KHK11a], [KHK11b], [2011b] entnommen werden.

## 2. Stand der Technik

Im Rahmen dieses Kapitels wird der Stand der Technik dargelegt. Nach einer Einführung in den Extrusionsprozess werden verschiedene Extrusionswerkzeuge sowie deren Einsatzbereiche aufgezeigt. Der Einfluss der Extrusionswerkzeug-Geometrie auf das extrudierte Produkt wird detailliert für Verteilerwerkzeuge vorgestellt und wichtige Dimensionierungsparameter sowie Auslegungskenngößen werden erläutert. Im Anschluss daran werden für das Verständnis der Arbeit notwendige Grundlagen zur virtuellen Produktentwicklung, zur Fluidmechanik und Strömungssimulation sowie zu Optimierungsalgorithmen vorgestellt.

### 2.1 Extrusion

Anhand von Abbildung 2.1 wird der Extrusionsprozess am Beispiel der Rohrextrusion erläutert: Die Verarbeitung von thermoplastischen Kunststoffen erfordert zunächst das Erwärmen des Rohstoffes auf eine Temperatur, so dass dieser in einen schmelzflüssigen also formbaren Zustand übergeht. Dies geschieht am Beispiel der Rohrextrusion in Extrudern (1), mit deren Hilfe das Granulat unter Einbringung von elektrischer Antriebsleistung (Rotation einer Schnecke in einem beheizten Zylinder (2)) erwärmt wird. Typische Verarbeitungstemperaturen bewegen sich in einem Bereich zwischen 170 °C und 400 °C. Der im Extruder schmelzflüssig vorliegende Kunststoff durchströmt aufgrund der Förderwirkung der Schnecke ein formgebendes Werkzeug (3), welches ebenfalls beheizt ist. Nach Durchlaufen des Werkzeuges hat der Kunststoff bereits seine gewünschte Grundform (z. B. Rohr, Profil, Schlauch), befindet sich aber auf dem Temperaturniveau der Verarbeitungstemperatur und ist somit plastisch verformbar.

Die endgültige Dimension erhält das Extrudat in einer anschließenden Kalibriereinheit (4), in der dem heißen Kunststoffprodukt so viel Wärme entzogen wird, dass es formstabil wird. Die weitere Produktkühlung bis auf das Niveau der Umgebungstemperatur geschieht in der nachgeschalteten - auf Temperaturen zwischen 10° und 20°C temperierten – Kühlstrecke (5), bestehend aus Sprühkühlbädern oder Wassertanks. Das so entstehende Rohr wird von Raupenabzügen (6) durch die Linie transportiert und in einer Konfektioniereinheit (7) auf die gewünschte Länge zugeschnitten [Mic06].

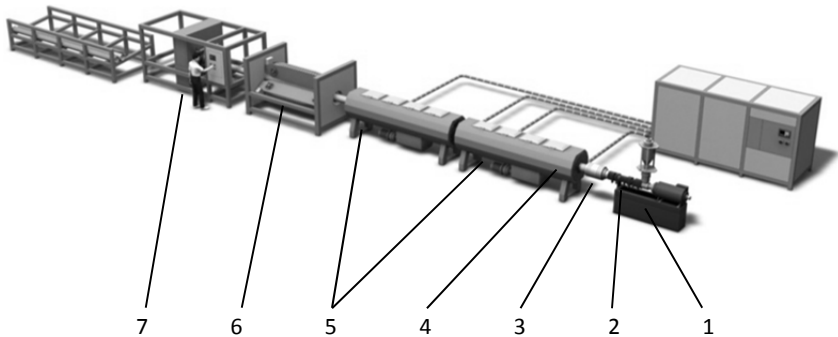


Abbildung 2.1: Modell einer Rohrextrusionslinie

Weitere Informationen zum Thema Extrusion können der Fachliteratur wie z.B. [Can06], [Chu00], [Hen97], [Joh04], [Mic03], [Mic06], [NoR01], [Rau01], [WhP03] entnommen werden.

### 2.1.1 Extrusionswerkzeuge

Das Extrusionswerkzeug formt aus der vom Extruder pulsationsfrei bereitgestellten sowie thermisch und stofflich homogenen Kunststoffschmelze die grundlegende Produktform des Halbzeuges aus. Extrusionswerkzeuge werden dabei grundsätzlich nach der Formkontur des Werkzeugaustrittsspalt in Werkzeuge mit kreisringförmigem Austrittsspalt (KRW) sowie in solche mit profilförmigem Austrittsspalt (PFW) unterteilt, wie in Abbildung 2.2 dargestellt.

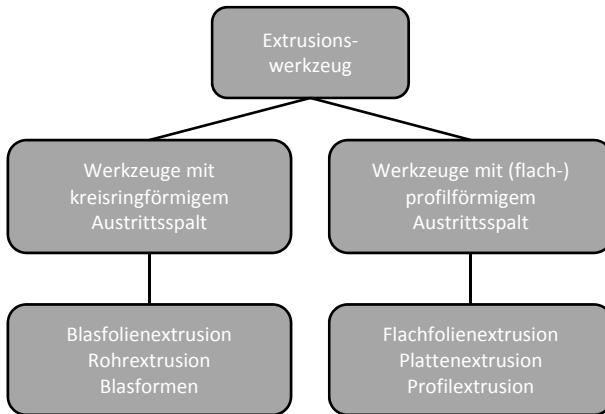


Abbildung 2.2: Klassifizierung von Extrusionswerkzeugen

Weiter lassen sich die KRW nach der Art des Werkzeugaufbaus, insbesondere nach der Art der Befestigung der Pinole oder des Dorns im Strömungsquerschnitt klassifizieren wie in Abbildung 2.3 dargestellt.

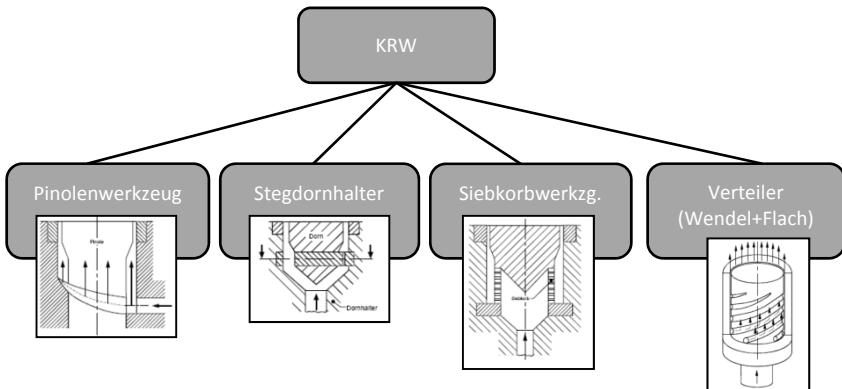


Abbildung 2.3: Unterteilung der KRW-Werkzeuge nach [Mic03]

Die Einsatzbereiche der verschiedenen Werkzeugklassen sowie deren Vor- und Nachteile sind in Tabelle 2.1 aufgeführt.

Pinole	Stegdorn	Siebkorb	Verteiler
+ freies Zentrum	+ zentrale Anströmung	+ kompakte Baumaße	+ keine Bindenähte
+ mechanische Festigkeit	+ sehr gute Schmelzeverteilung + betriebspunkt-unabhängig	+ Gewichtssparnis + gute Handhabbarkeit	+ hohe thermische Homogenität der Schmelze
- stark ausgeprägte Bindenaht	- wenige, stark ausgeprägte Bindenähte	- viele, schwach ausgeprägte Bindenähte	- aufwändige Fertigung, Auslegung

Tabelle 2.1: Überblick Extrusionswerkzeuge nach [Mic03]

Verteilerwerkzeuge nach dem Wendel- oder Radialverteilerprinzip zeigen gegenüber anderen Werkzeuggeometrien gewisse Besonderheiten auf, die im Folgenden für den Wendelverteiler erläutert werden.

### 2.1.2 Verteilerwerkzeuge

Wendel- und Radialverteiler gehören zur Kategorie der Verteilerwerkzeuge und werden in verschiedenen Bereichen der Kunststoffverarbeitung eingesetzt. Das mit solchen Verteilern erzeugte Halbzeug besitzt ein kreisförmiges Profil und dient als Ausgangsprodukt zur Erzeugung verschiedener Formen, wie beispielsweise Rohren, Schläuchen, Folien, Kabelummantelungen und diverser blasgeformter Hohlkörper wie Flaschen, Tanks, etc.

Wendel- und Radialverteiler eignen sich hervorragend für Coextrusions-Anwendungen, bei denen mehrere Verteilerwerkzeuge in radialer, konischer oder gestapelter Anordnung miteinander kombiniert werden, so dass Mehrschichtprodukte entstehen. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden diese „Coextrusionsverfahren“ nicht weiter berücksichtigt.

Der Grundaufbau eines Wendel- oder Radialverteilers besteht aus der Primär- oder Vorverteilung (Kapitel 2.2), der Sekundär- oder Hauptverteilung (Kapitel 2.3) sowie einem Düsenbereich in dem die Schmelze meist durch einen engen Strömungsquerschnitt zur Orientierung der Makromoleküle in Linienrichtung verstreckt wird.

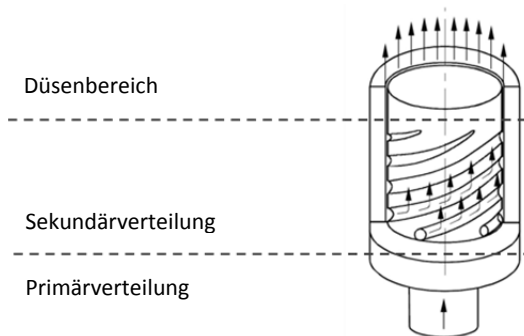


Abbildung 2.4: Grundaufbau Wendelverteiler nach [Mic03], [Joh04]

## 2.2 Primärverteiler

Die Primärverteilung übernimmt die Aufgabe, die Schmelze von einem zentralen oder am Umfang befindlichen Extruderanschluss ausgehend, den Speisebohrungen der Wendeln zuzuführen.

Folgende Aspekte müssen bei der Gestaltung eines Primärverteilsystems berücksichtigt werden:

- Strömungslängen
- Fertigungsmöglichkeiten und -kosten
- Fließwiderstände
- Schmelzeaufteilung
- Materialwechseleigenschaften
- Platzbedarf, Montierbarkeit nachfolgender Komponenten
- Druckverluste, Druckbelastung von Flächen <-> mech. Festigkeiten
- Thermische Beeinflussung der Schmelze
- Durchführbarkeit von Sekundärmedien (Stützluft, Kühlluft, etc.)



Die gebräuchlichsten Vorverteilsysteme sind der Sternvorverteiler (Abbildung 2.5, links), die  $2^n$ -Verteilung (mitte) sowie der längenbalancierte Vorverteiler (rechts).

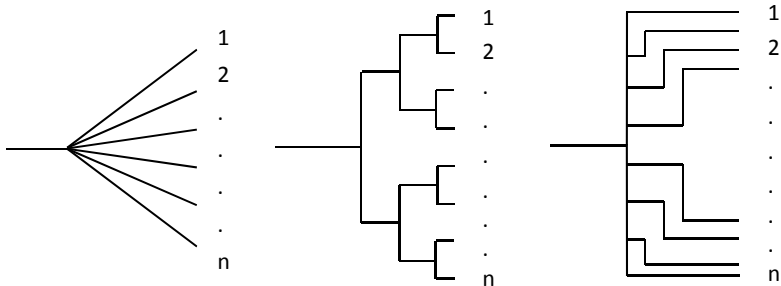


Abbildung 2.5: Prinzipdarstellung – Stern,  $2^n$ , längenbalanciert

**Sternvorverteilungssysteme** sind dadurch gekennzeichnet, dass die Schmelze in das Zentrum des Werkzeuges und von dort ausgehend über 2 bis „n“ gleich lange Schmelzkanäle gleichen Querschnitts dem Sekundärverteiler zugeführt wird.

**$2^n$ -Verteilssysteme** (auch als Hirschgeweihverteiler bezeichnet) teilen den Schmelzestrom mehrfach gleichmäßig, so dass  $2^n$  Wendeln gespeist werden können. Das  $2^n$ -Verteilprinzip kann sowohl in einer Werkzeugplatte als auch auf mehrere Werkzeugplatten in gestapelter Ausführung verteilt gestaltet sein. Ebenso bietet sich in einigen Fällen die Gestaltung dieses Verteilsystems auf dem Umfang eines rotationssymmetrischen Systems an.

**Längenbalancierte** (oder auch natürlich balancierte) Verteilsysteme basieren auf dem Prinzip der gezielten Variation von Fließkanallängen und Fließkanalquerschnitten. Die Dimensionierung wird derart gestaltet, dass durch eine Anpassung der Fließkanallängen und der Kanalquerschnitte gleiche Fließwiderstände erreicht werden. Eine häufige Methode ist die gezielte Verlängerung der Speisekanäle der sehr nahe dem Extruderanschluss gelegenen Wendeln zur Balancierung des Systems. Die Durchmesser der Kanäle bleiben dabei, aufgrund des sehr hohen Einflusses, nach Möglichkeit unverändert, siehe Formel 2.1 [Bur10].

$$\Delta p = \frac{8 \cdot \bar{\eta} \cdot L \cdot \dot{V}}{\pi \cdot R^4}$$

Formel 2.1: Druckverlust in einem runden Kanal (Hagen-Poiseuille)

Die Vor- und Nachteile der verschiedenartigen Vorverteilsysteme werden in Tabelle 2.2 aufgeführt:

Sternverteiler	2 <sup>n</sup> -Verteiler	Längenbal. Verteiler
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ kurze Fließwege</li> <li>+ einfache Fertigung</li> <li>+ geringe Druckverluste</li> <li>+ symmetrische Aufteilung</li> <li>+ guter Materialwechsel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ kompakte Bauweise</li> <li>+ Verteilung in einer Ebene möglich</li> <li>+ einfache Reinigung</li> <li>+ Gestaltungsfreiheit (auch auf dem Umfang eines Zylinders)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ einfache Fertigung</li> <li>+ nur eine Ebene erforderlich</li> <li>+ kostengünstig</li> <li>+ Sekundärverteiler mit vielen Einzelkanälen möglich</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- hoher Platzbedarf</li> <li>- Verschraubung nachfolgender Komponenten kompliziert</li> <li>- eingeschränkte Gestaltungsfreiheit</li> <li>- lange Sternbohrungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- lange Fließwege</li> <li>- Materialwechselzeit</li> <li>- Druckverlust</li> <li>- Fertigungskosten</li> <li>- asymmetrische Aufteilung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- thermische Beeinflussung</li> <li>- Druckverluste</li> <li>- Materialwechsel</li> <li>- max. Durchsatz gering</li> </ul>

Tabelle 2.2: Überblick Primärverteiler [Bur04], [Bur10], [FiM06]

Als Alternative zur separaten Speisung jeder Bohrung und damit jeder Wendel werden in einigen Fällen Breitschlitzverteiler eingesetzt, bei denen mehrere Wendeln aus nur einem Fließkanal der Vorverteilung gespeist werden können. Ein solches Werkzeug ist in Abbildung 2.6 (rechts) dargestellt. Hauptvorteil dieser Werkzeugklasse liegt in der Umsetzbarkeit sehr vieler Wendelkanäle. Details zu Breitschlitzverteilerwerkzeugen können z.B. [Mic03] entnommen werden.



Abbildung 2.6: verschiedene Vorverteilungen [Bur06]

### 2.3 Sekundärverteiler

Der Sekundärverteiler beginnt direkt im Anschluss an den Primärverteiler (in der Ebene der Speisebohrungen) und hat die Aufgabe aus der zugeführten Schmelze ein kreisförmiges, bindenahtfreies, homogenes Schmelzeprofil auszuformen. Die komplexen strömungsmechanischen Vorgänge in der Sekundärverteilung stellen seit der Entwicklung der ersten Verteilerwerkzeuge ein Feld vieler Forschungsarbeiten dar. Die unten aufgeführte Übersicht klassifiziert die Schwerpunkte einiger dieser Arbeiten in Kategorien.

Während in den 70er, 80er und 90er Jahren zunächst am Verständnis der Zusammenhänge zwischen Geometrie-, Prozess- und Materialparametern sowie der zu erwartenden Produktqualität gearbeitet wurde, rücken mit dem Aufkommen leistungsfähiger Rechensysteme vermehrt modellbildende, mathematische Ansätze in den Fokus, um die Produktqualität vorherzubestimmen. Mit dem Aufkommen von FEM- und CFD-Methoden dominieren diese die publizierten Forschungsarbeiten, bis schließlich (mit zeitlichen Überschneidungen) Automatisierungsansätze verstärkt in den Vordergrund treten. (Eine Abgrenzung der hier vorliegenden Arbeit zu weiteren Arbeiten mit Automatisierungsbezug erfolgt im weiteren Verlauf.)

Kategorisierung von Forschungsarbeiten zum Thema der Extrusionswerkzeugauslegung:

- Korrelationen Geometrie, Material-, Prozessspezifika und Produktqualität  
[Pro72], [WJM77], [WoM77], [Rau87], [Wor95], [FiW98],  
[SpW00], [Sti02], [HiK03], [SuG04], [Sei05], [Bur06], [MGF08],  
[LSP09], [Mic09]
- modellhafte, mathematische Auslegung von Extrusionswerkzeugen  
[MMB84], [VKK84], [SaA84], [WiF86], [VVP88], [PVV89],  
[Hua98], [LiS98], [Fis01], [LiS02], [MiB04b], [MiB04a], [MBS07]
- FEM- (CFD-) gestützte Auslegung von Extrusionswerkzeugen  
[WoS82], [MMW89], [Fan99], [Fis00], [ZTP01], [Rot02], [Lan03],  
[WiL03a], [WiL03b], [SSP03], [FrC04], [PVS05], [KoR06], [LWS06],  
[Mar06], [Sei06], [BFW10]
- Automatisierung der Auslegungsstrategie  
[CNP03], [CNP04], [Kau04], [MiK04], [WNR04], [MKF05],  
[MeL06], [MSB07], [Cre08], [MiB09], [EPN10]

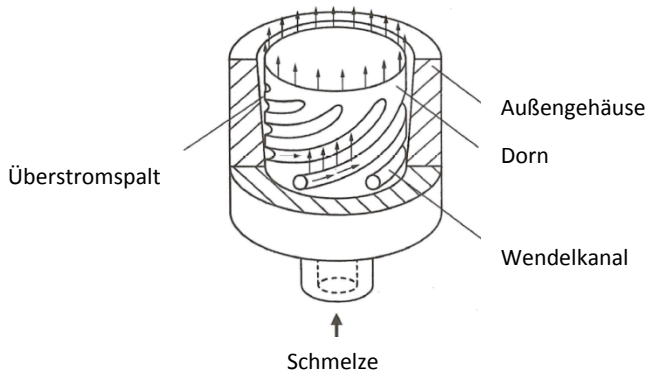
Im Folgenden wird nach einer kurzen Einführung in die Strömungsvorgänge und die Anforderungen an einen Wendelverteiler der Stand der Technik im Bereich der Auslegung von Extrusionswerkzeugen dargestellt. Nach einer Erläuterung der Korrelationen zwischen Geometrie, Material- und Prozessspezifika auf die Produktqualität werden verschiedene Optimierungsstrategien erläutert und es erfolgt eine Abgrenzung dieser Arbeit zu bereits durchgeführten Forschungsvorhaben.

### 2.3.1 Funktionsprinzip, Anforderungen

Die **Schmelzeverteilung** im Sekundärverteiler basiert auf einer Überlagerung eines axial gerichteten sowie eines in Umfangsrichtung gerichteten Schmelzestromes. Die Wendelkanäle verlaufen schraubenförmig auf dem Dorn (vgl. Abbildung 2.7), wobei ihre Tiefe vom Anfangswert (Höchstwert) (i.d.R.) kontinuierlich bis auf den

Dorndurchmesser abnimmt. Die Spaltweite zwischen dem zylindrischen Außengehäuse und dem Dorn nimmt (i.d.R.) kontinuierlich zu.

Aufgrund der abnehmenden Kanaltiefe der Wendeln nimmt die Schmelze-Volumenstrom innerhalb des Wendelkanals kontinuierlich ab und es bildet sich ein axialer Schmelzestrom im Spalt zwischen Dorn und Zylinder aus. Dieser Leckstrom



strömt in axialer Richtung (in Richtung Werkzeugauslass) und vereinigt sich (verwischt) mit anderen Wendelströmungen.

Abbildung 2.7: Prinzipdarstellung eines Wendelverteilers nach [Cre08]

Die produktbezogenen **Forderungen** lassen sich übertragen in Forderungen an die Strömungssituation innerhalb des Werkzeuges, die durch konstruktive Veränderungen der Geometrie beeinflusst werden kann. Tabelle 2.3 zeigt einen exemplarischen Auszug dieser Gegenüberstellung für die entscheidenden Faktoren.

Produktbezogene Forderungen	Schmelzeströmung
<b>Mechanik und Optik</b>	Überlappungswinkel, Wandschubspannungen
<b>Wanddicken</b>	Geschwindigkeitsverteilung, thermische Homogenität
<b>Spülbarkeit</b>	keine Stagnationszonen, keine Bereiche sehr geringer Wandschubspannungen
<b>Geringer Verschleiß, Betriebskosten</b>	Druckverlust
<b>Schmelzebruch</b>	Wandschubspannungen

Tabelle 2.3: Produktbezogene Forderung – Schmelzeströmung

### 2.3.2 Auslegung der Geometrie

Die Geometrie des Sekundärverteilers sowie die Auswirkungen der geometrischen Gestaltung auf Auslegungsgrößen werden im Folgenden dargestellt.

Die freien Geometrieparameter eines klassischen Wendelverteilers (ohne Extruderanschluss, Primärverteilung und Düsenbereich) umfassen (vgl. Abbildung 2.8):

- Durchmesser ( $D$ )
- Bauhöhe ( $L$ )
- Anzahl der Wendeln
- Steigung der Wendeln
- Wendelkanaltiefe ( $H$ )
- Wendelkanalbreite
- Spaltweite des Überstrombereiches ( $S$ )
- Gestaltungsdetails (Radien, Fasen, Dichtflächen)

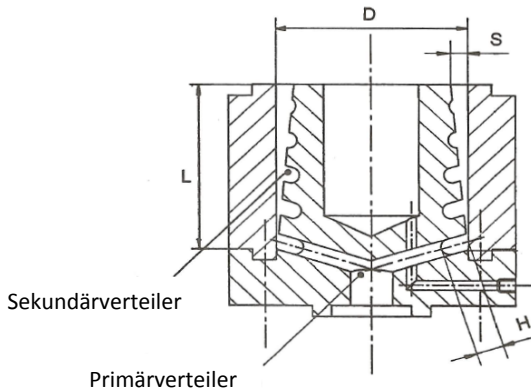


Abbildung 2.8: Geometrieparameter am Wendelverteiler nach [Cre08]

Der Durchmesser und die Höhe des Systems werden in der Regel durch das Produkt sowie den zur Verfügung stehenden Bauraum definiert und stellen somit die Ausgangssituation für die Auslegung des Systems dar.

Zur Erläuterung des Einflusses verschiedener Geometrieparameter wird die **Leckstromkurve** eingeführt. Bei der Leckstromkurve wird unterschieden in die Leckstromkurve entlang einer Wendel und in die aufsummierte Leckstromkurve entlang eines Verteilersegmentes.

Die Leckstromkurve kann aus den lokalen Geschwindigkeiten in axialer Richtung, den Spaltweiten sowie einem betrachteten Segment über dem Umfang bestimmt werden. Leckstromkurven beschreiben den in axiale Richtung strömenden Volumenstrom im Bereich des Spaltes über der Länge einer Wendel (oder der Bauhöhe des Verteilers), wobei - je nach Steigungswinkel der Wendeln - der letzte Abschnitt der Kurve dem Bereich zwischen zwei Kanalenden entspricht [Sti02].

Die ideale Form der Leckstromkurve kann laut [Bur06] stark variieren und ist von dem jeweiligen Anwendungsfall abhängig. In [Mic03] wird empfohlen, dass der Leckvolumenstrom, bezogen auf die Hälfte des gleichmäßigen Leckvolumenstroms (Wendeleintrittsvolumenstrom/Wendellänge) innerhalb des ersten Drittels der

Wendellänge kontinuierlich bis auf das 3- bis 4-fache ansteigt und dann stetig abfällt bis er den Wert Null (bei ca.  $2/3$  der Wendellänge) erreicht. Stieglitz [Sti02] bestätigt diese Forderung und empfiehlt zur Erreichung einer gleichmäßigen Produkt-Dickenverteilung ebenfalls einen möglichst gleichmäßigen Verlauf der Leckstromkurve im Endbereich.

Eine hohe Wendelanzahl führt zu einer Vergleichmäßigung des Verlaufs der Leckstromkurve. Dies erklärt [Sti02] mit einer Erhöhung der Überlappungsanzahl und mit einer Abnahme des Volumenstroms pro Kanal. Als Nachteil werden daraus resultierende geringere Schergeschwindigkeiten im Kanal genannt, welche zu geringeren Wandschubspannungen führen, was die Gefahr von Ablagerungen stark erhöht. Rauwendaal [Rau87] kam in bereits zuvor durchgeführten Arbeiten zu gleichem Ergebnis bezüglich des positiven Einflusses der Wendelanzahlerhöhung auf die Verteilwirkung, ermittelt darüber hinaus aber bei einer steigenden Wendelanzahl eine Abnahme des Druckverlustes im Werkzeug. Dies widerspricht der Schlussfolgerung von [Sti02], dass eine hohe Wendelanzahl zu geringeren Wandschubspannungen führt (Druckverlust proportional zu Wandschubspannungen), kann aber dadurch erklärt werden, dass [Sti02] von vollständig gleichbleibenden Geometrieparametern und damit von einer deutlichen Vergrößerung des freien Volumens im Verteiler ausgeht. Malakzadeh [MGF08] bestätigt die Verbesserung der Verteilwirkung sowie die Reduzierung des Druckverlustes durch eine Erhöhung der Wendelanzahl, so dass als Fazit formuliert werden kann:

*Fazit<sup>3</sup>: Eine Erhöhung der Wendelanzahl verbessert die Verteilwirkung und verringert den Druckverlust des Werkzeuges (bei gleichbleibender Wendelgeometrie).*

Neben der Anzahl der Wendeln spielt auch die **Gestaltung der Wendeln** (Breite, Tiefe, Steigung) eine wesentliche Rolle bei der Auslegung eines Verteilerwerkzeuges. Malakzadeh [MGF08] zeigt für steigende Wendelanfangstiefen eine Vergleichmäßigung der Verteilwirkung, wobei diese für weiter steigende Kanalansatzstiefen degressiv voranschreitet. Eine Abnahme des

---

<sup>3</sup> Sämtliche aufgeführten Fazits beziehen sich auf ansonsten unveränderte Bedingungen/Geometrieparameter



Druckverlustes ist aufgrund der Vergrößerung der Querschnitte und damit einhergehend geringeren Reibungsverlusten obligatorisch [Cre08], [Rau87].

*Fazit: Eine Erhöhung der Kanalanzangstiefe führt zu einer gleichmäßigeren Verteilwirkung und einer Verringerung des Druckverlustes, kann aber negativen Einfluss auf die Spülbarkeit des Werkzeuges haben.*

Der **Steigungswinkel** der Wendeln hat einen signifikanten Einfluss auf die Strömungseigenschaften. Rauwendaal [Rau87] zeigt für zunehmende Steigungswinkel eine deutliche Verschlechterung der Schmelzeverteilung bei einer gleichzeitig deutlich verbesserten Druckverlustcharakteristik des Werkzeuges aufgrund der verringerten Strömungswiderstände. In der Regel ist der Steigungswinkel über die gesamte Bauhöhe des Verteilers konstant, es gibt jedoch vereinzelt auch Fälle in denen die Steigung im Auslaufbereich variiert wird [Sti02] oder auch Konzeptwerkzeuge, die nach einer gewissen Wendellänge eine Steigungsänderung aufweisen [Bur06].

*Fazit: Geringe Steigungswinkel verbessern die Schmelzeverteilung, verursachen aber einen höheren Druckverlust.*

Weitere wichtige Einflussgrößen sind die Gestaltung der Anfangsspaltweite des Überstrombereiches sowie des Spaltweitenverlaufes. Ein großer Einfluss der Anfangsspaltweite auf die Verteilwirkung des Extrusionswerkzeuges wird in unterschiedlichen Arbeiten ([Cre08], [Sti02], [MGF08], [Rau87]) bestätigt.

*Fazit: Die Anfangsspaltweite hat einen Einfluss auf die Verteilwirkung, dieser Einfluss wird aber durch den Spaltweitenverlauf dominiert. Geringe Anfangsspaltweite führen zu erhöhtem Druckverlust.*

Rauwendaal [Rau87] beschreibt den Einfluss des **Spaltweitenverlaufes** als nicht eindeutig. Bei einer Vergrößerung des Spaltweitenverlaufes bis zu einem bestimmten Wert, verbessert sich die Verteilwirkung zunächst, nimmt bei Überschreiten dieses „optimalen“ Wertes jedoch wieder ab. Auch [MGF08] erwähnt im Zusammenhang mit dem Spaltweitenverlauf die Existenz eines Optimums. [Cre08] stellt den Zusammenhang auf, dass große Spaltweiten zu einer gleichmäßigen Volumenstromverteilung führen, wohingegen geringe Spaltweiten

diese verschlechtern. Er belegt diesen Sachverhalt demnach nicht explizit, widerlegt diesen jedoch auch nicht. Die Aussagen von [Cre08] stützen sich dabei auf rechnerisch ermittelte Leckstromkurven für Radialverteilerwerkzeuge.

*Fazit: Der Spaltweitenverlauf hat einen starken Einfluss auf die Qualität der Verteilung des Extrusionswerkzeuges. Die Existenz eines Optimums ist wahrscheinlich.*

Bei der Auslegung eines Extrusionswerkzeuges nimmt die **Betriebspunktunabhängigkeit** des Werkzeuges eine wichtige Position ein. Ein optimal betriebspunktunabhängiges Werkzeug wird in [Wor78] über eine konstante Schergeschwindigkeit und Viskosität im gesamten Verteilersystem definiert. Die Erfüllung dieser Forderung ist zwar praktisch nicht möglich, es sollte jedoch stets versucht werden diesem Idealzustand möglichst nah zu kommen. Andere Forschungsarbeiten (z.B. [MMB84], [LSP09], [HiK03], [SuG04]) ziehen dazu unterschiedliche Schmelzeigenschaften in Betracht. Die Berücksichtigung der Betriebspunktunabhängigkeit des Werkzeuges wird in dieser Arbeit im weiteren Verlauf erneut aufgegriffen.

### 2.3.3 Automatisierung der Auslegungsprozesses

Mit dem Aufkommen hochleistungsfähiger Rechnersysteme und damit verbunden, einer wirtschaftlichen Einsetzbarkeit von computergestützten Methoden zur Werkzeugauslegung, rücken vermehrt automatisiert ablaufende Auslegungsmethoden in den Fokus aktueller Forschungsarbeiten. Die Automatisierung der Auslegung wird sowohl für Profilwerkzeuge (z.B. [CNP03], [CNP04], [Kau04], [MiB09], [MiK04], [MKF05], [MSB07]) als auch für Verteilerwerkzeuge (z.B. [Cre08], [FrC04], [MeL06]) vorgenommen. Problematisch bei der Automatisierung sind unterschiedliche Aspekte. Zum einen ist eine hohe Robustheit des Prozesses notwendig, so dass die Abbruchwahrscheinlichkeit des Automatismus gering wird, zum anderen ist das Vorhandensein eines aussagekräftigen Zielkriteriums ein wesentlicher Aspekt, der über die Qualität der Auslegung entscheidet. Derzeit existiert keine kommerzielle, vollständig eingebettete Softwaresystemlösung zur automatisierten Optimierung komplexer Fließkanalgeometrien für die Kunststoffbranche.

Bisher durchgeführte Arbeiten legen (i.d.R.) das diskretisierte Fluidvolumen zugrunde, welches durch Verschiebung der Knotenelemente eine Änderung des Fluidvolumens und der -geometrie hervorruft. Nachteil dieser Methodik ist der vollständige Verlust sämtlichen im CAD-System zur Verfügung stehenden Wissens über geometrische Zusammenhänge, Verknüpfungen, etc. sowie die Notwendigkeit einer Rück-Überführung der variierten Geometrie in das virtuelle Modell.

Zur automatisierten Optimierung eines Radialverteilers wird von [Cre08] als Zielkriterium die Geschwindigkeitsverteilung über dem Auslass, der Druckverlust des Systems, die maximale Schergeschwindigkeit sowie die Fläche unter der Leckstromkurve herangezogen. Diese Größen werden mit Hilfe der gewichteten Summenmethode<sup>4</sup> in einen skalaren Wert überführt, der als Zielgröße einer einkriteriellen Optimierung dienen kann. Der eingesetzte Algorithmus ist ein gradientenbasiertes Optimierungsverfahren. Besonderheit bei diesem publizierten Verfahren ist die Zugrundelegung eines Schalenmodells für die FE-Simulation. Geometrievariationen werden dabei ausschließlich durch eine Variation des Finite-Elemente Netzes hervorgerufen.

Problematisch bei dieser Vorgehensweise ist, dass durch eine Variation der Knoten des Finite Elemente Netzes nahezu beliebige Geometrien entstehen können. Die so entstandene Gestalt muss nach dem Optimierungsvorgang durch „reverse engineering“ in das CAD-System übertragen werden und kann dann für die Fertigung (z.B. mit Computer Aided Manufacturing - CAM) Methoden vorbereitet werden. Da bei der Optimierung auf Basis der Netzelemente keine geometrische Einschränkung vorliegt, ist die Generierung eines Designvorschlages möglich, welcher sich mit herkömmlichen Fertigungsmethoden nicht (oder nicht wirtschaftlich) realisieren lässt.

Eine Abgrenzung der vorliegenden Arbeit zu anderen Arbeiten erfolgt durch folgende Aspekte:

- Vollständig parametrisches, assoziatives 3D-CAD-Modell ist Ausgangspunkt sämtlicher Geometrievariationen
- Initialmodell beliebig parametrierbar

---

<sup>4</sup> gewichtete Summenmethode, siehe Kapitel 2.6

- Einbeziehung des Überlappungswinkels sowie der Betriebspunktunabhängigkeit in die Werkzeug-Qualitätsanalyse
- Formulierung eines Werkzeugqualitätskriteriums
- Manuelle, computergestützte Auslegung eines vollständig neuartigen Extrusionswerkzeug-Konzeptes

## **2.4 Virtuelle Produktentwicklung (CAD)**

Ausgangspunkt für die simulationsgestützte Auslegung von Bauteilen ist ein dreidimensionales Geometriemodell. Die Modellierung kann mit Hilfe verschiedener Softwaresysteme sowie verschiedener Modellierungsstrategien erfolgen. Die Anzahl verschiedener Softwaresysteme am Markt ist bereits jetzt fast unüberschaubar, ebenso wie die unterschiedlichen spezifischen Möglichkeiten der einzelnen Systeme am Markt. Dennoch hat die Bedeutung von 3D-CAD-Systemen am Markt in den vergangenen Jahren kontinuierlich zugenommen, so dass heutzutage vielfach das Geometriemodell der Ausgangspunkt für unterschiedlichste Prozesse ist.

Die Zusammenfassung aller rechnergestützten Prozesse, die auf einem vollständigen, durchgängigen Datenmodell aufbauen, wird als virtuelle Produktentwicklung beschrieben [Bli05].

Kern der virtuellen Produktentwicklung ist das 3D-CAD Modell. In dieses Modell lässt sich durch verschiedene angedockte Softwaresysteme weiterführendes Wissen über das Produkt integrieren oder das Modell kann der Ausgangspunkt für weiterführende Prozesse wie beispielsweise Festigkeitsanalysen, Strömungssimulationen, Kollisionsprüfungen, kinematische Untersuchungen oder auch Einbausimulationen sein. Das CAD-Modell stellt in der heutigen Produktentwicklung eine Schlüsselposition dar, auf der unterschiedliche andere Prozesse aufbauen.

### **2.4.1 Auswahl der Konstruktionsart**

Computergestützte Konstruktionen werden unterschieden in die verschiedenen Konstruktionsarten - Neukonstruktionen, Anpassungskonstruktionen und Variantenkonstruktionen. Während Neukonstruktionen vollständig neue Aufgaben

und Probleme lösen, bleibt bei einer Anpassungskonstruktion das Lösungsprinzip erhalten. Es wird lediglich die Gestaltung angepasst. Im Falle einer Variantenkonstruktion werden nur gewisse Parameter (z.B. Tiefen, Spaltweiten) variiert [PBF07].

Das Initial-CAD-Modell, welches als Ausgangspunkt für Optimierungen dienen soll wird zunächst „neukonstruiert“. Im Laufe des manuellen Optimierungsprozesses sind „Anpassungskonstruktionen“ möglich, während im Verlaufe der automatisierten Optimierung Variantenkonstruktionen durchgeführt werden.

#### 2.4.2 Rechnergestütztes Konstruieren

Die Entwicklung von CAD-Systemen begann in den 1960er Jahren und ist seitdem stetig vorangeschritten - angefangen bei der Entwicklung eines einfachen Sketchpads, mit dem es möglich war einfache technische Zeichnungen zu erstellen und zu manipulieren über die Zwischenstufe der 2D-CAD-Systeme bis hin zu den heute üblichen 3D-CAD-Systemen.

Heutige 3D-CAD-Systeme stellen die Basis der virtuellen Produktentwicklung dar und basieren auf unterschiedlichen rechnerbasierten Verfahren zur dreidimensionalen Produktbeschreibung, den Drahtmodellen, Flächenmodellen und den Volumenmodellen [Lup09].

	<b>Drahtmodelle</b>	<b>Flächenmodelle</b>	<b>Volumenmodelle</b>
<b>Geometrie</b>	3D-Punkte, 3D-Flächen	Begrenzungsflächen	Körperbeschreibung
<b>Volumen- information</b>	nicht vorhanden	nicht vorhanden	vorhanden
<b>Bauteilschnitte, Durchdringung</b>	nicht möglich	nicht möglich	möglich
<b>Rechner- anforderungen</b>	gering	gering	hoch
<b>Übertragbarkeit</b>	sehr gut	gut	bedingt möglich

Tabelle 2.4: Dreidimensionale Produktbeschreibung nach [Lup09]

Die zentrale Einheit eines CAD-Systems ist der Modellierkern (Geometric Modelling Kernel - GMK), der Verfahren zur Synthese der 3D-Modelle wie das Generieren von geometrischen Elementen oder komplexe geometrische Operationen wie das Schneiden oder das Vereinigen zur Verfügung stellt. Dieser ist eng mit dem Datenmodell verknüpft, welches die rechnerinterne Repräsentation des Modells enthält [GHK06].

Die rechnerinterne Beschreibung von Volumenmodellen kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Übliche Methoden sind Kantenmodelle, Boundary Representation (BREP), Constructive Solid Geometry (CSG), Polygonnetze und Voxelgitter bzw. Octrees. [Sch09]

Innerhalb eines (herstellerspezifischen) CAD-Datenformates ist sämtliches in das Modell eingebrachte Wissen existent. Die Komplexität dieser Wissensbasis kann sehr stark variieren. Angefangen bei der Implementierung von rein geometriebezogenen Informationen (z.B. ein Feature wiederholt sich im Abstand von  $n$ ) bis hin zu sehr komplexen, mathematischen oder abfragebasierten Funktionen (z.B. Topologieänderung in Abhängigkeit einer mathematischen Berechnung). Diese im CAD-Modell enthaltene Intelligenz geht bei einem Transfer des Modells in ein neutrales Datenformat (z.B. IGES, STEP) in den meisten Fällen vollständig verloren. Die Geometrie besteht fortan aus einer Verknüpfung von Punkten, Linien und Flächen (BREP).

## 2.5 Fluidmechanik und Strömungssimulation (CFD)

*„Fluide sind gasförmige oder flüssige Kontinua“* [Böc04]. Als Kontinuum wird eine stetige Anhäufung von materiellen Punkten oder auch eine hypothetische, kontinuierliche Substanz verstanden, die ihre Form leicht verändern kann und deren materielle Bestandteile sich dabei relativ zueinander bewegen können [Bet01], [FeP02]. Die Bewegung von Fluiden in einer gerichteten Form wird als eine Strömung bezeichnet [FeP02].

Die computergestützte Simulation von Strömungen (Computational Fluid Dynamics – CFD) ist eine relativ junge Wissenschaft, deren Ursprünge hinsichtlich Modellbildung und numerischer Mathematik jedoch weit in die Vergangenheit reichen. Das Fehlen leistungsfähiger Computersysteme stellte jedoch zu Beginn

eine große Hürde dar, so dass diese Technologie erst seit den 80er Jahren, mit kontinuierlichem Wachstum, im Maschinenbau und in der Verfahrenstechnik eingesetzt wird. Heutzutage sind CFD-Berechnungen innerhalb der Branche etabliert, auch wenn die Modellierung auch heute noch oft an die Kapazitätsgrenzen und Leistungsgrenzen moderner Rechnersysteme oder gar von Rechenclustern heranreicht [Pas04].

Im Folgenden werden die verschiedenen Fluidarten vorgestellt sowie die das Fließverhalten charakterisierenden Materialeigenschaften erläutert. Im Anschluss daran werden wesentliche Grundlagen zur Fluidodynamik erläutert. Die Vorstellung der üblichen Auswertemethoden heutiger Postprozessoren schließt das vorliegende Kapitel.

### **2.5.1 Fluiddaten zur Berechnung**

Bei Fluiden wird unterschieden in die Newtonschen Fluide und in die Nicht-Newtonschen Fluide. Die Nicht-Newtonschen Fluide werden untergliedert in Fluide mit plastischem, pseudoplastischem, dilatantem und Ostwaldschem Verhalten. Ferner müssen viskoelastische Fluide genannt werden, die über eine Art Gedächtnis verfügen. Zur Beschreibung der unterschiedlichen Fluide wird der Begriff der Viskosität herangezogen, sowie die Abhängigkeit der Viskosität von der Schubspannung und der Schergeschwindigkeit.

Geht die Verformungsgeschwindigkeit gegen Null, so geht auch die zur Verformung notwendige Scherkraft gegen Null. Diese Eigenschaft ist abhängig von der Viskosität (dem Widerstand eines Stoffes gegen das Fließen) eines Fluides [SpA06]. Eine Gegenüberstellung eines newtonschen und eines strukturviskosen Fluidverhaltens zeigt Abbildung 2.9 (nach [Sie09]).

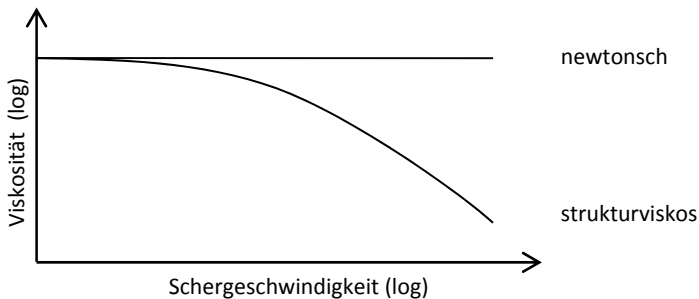


Abbildung 2.9: Viskositätskurve

**Newtonsche Fluide** zeichnen sich dadurch aus, dass sich deren Viskosität nicht mit einer Änderung der Scherrate verändert, sondern konstant bleibt.

Die Fluidmechanik behandelt das Fließverhalten Newtonscher Fluide. Die Wissenschaft des Fließverhaltens von Stoffen wird als **Rheologie** bezeichnet. Die Viskosität ändert sich mit der Schergeschwindigkeit, siehe Abbildung 2.9.

Die Viskosität eines **pseudoplastischen-** oder **strukturviskosen Fluides** sinkt (in logarithmischer Darstellung) progressiv mit wachsenden Schergeschwindigkeiten. Strukturviskoses Verhalten zeigen insbesondere Kunststoffschmelzen oder andere makromolekulare Substanzen mit länglichen Partikeln. Die im Ruhezustand stark untereinander verschlungenen Makromoleküle lösen sich durch die Krafteinwirkung (Scherung), gleiten aneinander ab und orientieren sich immer stärker in Scherrichtung, so dass der Widerstand gegen das Fließen abnimmt. Für die detaillierte Beschreibung der weiteren Fluidarten wird auf die Fachliteratur z.B. [Sie09] verwiesen.

### Viskosität

Die Viskosität gehört zu den entscheidenden Materialdaten zur Beschreibung von Fließvorgängen. Für die dynamische Viskosität gilt:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [Pa \cdot s]$$

Formel 2.2: Dynamische Viskosität



Zur Beschreibung des Fließverhaltens strukturviskoser Medien wird die dynamische Viskosität herangezogen. Der Verlauf der dynamischen Viskosität für verschiedene in dieser Arbeit verwendete Polymere ist in Abbildung 2.10 zu sehen. Die Abszissenachse zeigt in logarithmischer Skalierung die Schergeschwindigkeiten. Auf der Ordinatenachse ist die dynamische Viskosität in ebenfalls logarithmischer Skalierung aufgetragen.

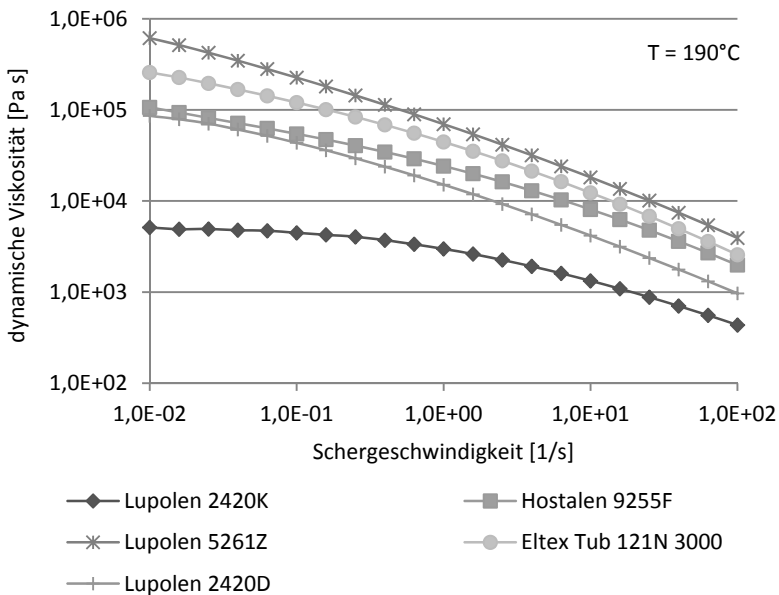


Abbildung 2.10: Gemessene Viskositätsdaten von Kunststoffen

Die dargestellten Viskositätswerte stammen aus Messungen an Rotationsrheometern und bilden die Basis zur Ableitung eines Materialmodells für die Simulationsrechnungen. Gemäß der Cox-Merz-Regel besteht eine Äquivalenz zwischen der Schergeschwindigkeitsabhängigkeit der Viskosität und der Drehfrequenzabhängigkeit der komplexen Viskosität [Gie94].

Der für Kunststoffschmelzen typische, strukturviskose Verlauf ist gut ersichtlich. Die Viskosität sämtlicher gemessener Materialien nimmt mit zunehmender

Schergeschwindigkeit ab. Einige Materialien (z.B. Lupolen 2420K) zeigen bei sehr geringen Schergeschwindigkeiten ein fast newtonsches Verhalten und knicken erst bei höheren Schergeschwindigkeiten in den strukturviskosen Bereich ein. Ebenfalls sind die erheblichen Viskositätsunterschiede der verschiedenen Materialien sehr gut ersichtlich.

Zur mathematischen Beschreibung der Viskosität eines strukturviskosen Materials existieren verschiedene Formulierungen. Die gebräuchlichsten Formulierungen sind der „Carreau-Ansatz“ sowie der „Potenzansatz nach Ostwald/de Waele“. Der Carreau-Ansatz zeigt gegenüber dem Potenzansatz eine verbesserte Abbildegenauigkeit im Bereich sehr kleiner Schergeschwindigkeiten, so dass im weiteren Verlauf dieser Arbeit der Carreau-Ansatz eingesetzt wird.

Zur Einbeziehung der Temperaturabhängigkeit kann auf den Temperaturverschiebungsansatz nach Williams-Landel-Ferry (WLF) sowie auf die Arrhenius-Gleichung zurückgegriffen werden [MHM02]. Aufgrund der in dieser Arbeit eingesetzten Vereinfachung (isothermen Strömungssimulation) wird die Temperaturverschiebung nicht detailliert erläutert, kann aber der Fachliteratur z.B. [Gie94], [Mic06] entnommen werden.

Der **Carreau-Ansatz** eignet sich zur Beschreibung sowohl des strukturviskosen, als auch des newtonschen Bereiches. Die Formulierung des Carreau-Ansatzes (inklusive Temperaturverschiebungsfaktor z.B. WLF oder Arrhenius) lautet:

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \frac{A \cdot a_T}{(1 + B \cdot \dot{\gamma} \cdot a_T)^c}$$

Formel 2.3: Carreau-Ansatz inkl. Temperaturverschiebungsfaktor

Der Carreau-Ansatz ist aufgrund seiner Vorteile in verschiedenen CFD-Simulationssystemen der Standard-Ansatz zur Beschreibung des strukturviskosen Materialverhaltens und wird auch in den Simulationen dieser Arbeit verwendet.

### 2.5.2 Grundgleichungen der Strömungssimulation

Zur Beschreibung der Bewegung eines Kontinuums existieren unterschiedliche Methoden, die gebräuchlichsten sind die **Lagrange'sche** und die **Euler'sche** Modellvorstellung. Während Lagrange von einer teilchenfesten Betrachtung ausgeht und ein Teilchen (und dessen Strömungsgrößen) entlang seiner Bahn im Raum verfolgt, geht Euler von einer ortsfesten Betrachtungsweise aus und betrachtet an einem festen Ort die Änderung der Strömungsgrößen [Bet01].

Die übliche Formulierung physikalischer Grundgleichungen erfolgt in der Regel in der Lagrange'schen Darstellungsweise. Da heutige Strömungssimulationssysteme jedoch aufgrund der Diskretisierung in ein Netz finiter Volumina keine teilchenfeste Betrachtungsweise verfolgen können, werden die strömungsbeschreibenden Grundgleichungen (mit Hilfe des Transporttheorems von Reynold) von der Lagrange'schen Darstellungsweise in die Euler'sche Darstellungsweise überführt.

Die Grundgleichungen heutiger CFD-Systeme sind die Erhaltungsgleichungen, zusammengefasst in den **Navier-Stokes-Gleichungen**<sup>5</sup>. Diese umfassen die Erhaltungsgleichung der Masse (Kontinuitätsgleichung), der Energie sowie des Impulses in die drei Raumrichtungen. Die Navier-Stokes-Gleichungen (NSG) beschreiben das Verhalten jeder beliebigen Strömung vollständig, also auch die kleinsten Wirbel und Turbulenzen. Die Rechenzeiten für eine vollständige Berechnung mit hohem Detaillierungsgrad wären aber derart hoch, dass Turbulenzen und andere kleinskalige Wirbel sich mit heutigen technischen Möglichkeiten nur über zusätzliche Turbulenzmodelle beschreiben lassen.

Die NSG bilden ein gekoppeltes, nichtlineares Differentialgleichungssystem. Eine analytische Lösung dieses Gleichungssystems ist derzeit nur für stark vereinfachte Fälle möglich [Lec09]. Die NSG lassen sich in skalarer, vektorieller und divergenter Form aufstellen, eine ausführliche Darstellung der Formulierung kann z.B. [Lec09] entnommen werden.

---

<sup>5</sup> C. Navier, franz. Physiker und Ingenieur, † 1836; G. Stokes, brit. Mathematiker und Physiker, † 1903

Werden durch die strömungsbeschreibenden Randbedingungen Vereinfachungen getroffen, reduzieren sich die NSG um einzelne Terme, so dass der Rechenaufwand sinkt. In der vorliegenden Arbeit wird Stationarität, Inkompressibilität, Wandhaftung und Laminarität angenommen.

Weiterführende Details zur Fluidodynamik, Rheologie und Numerik von Strömungssimulationssoftware können z.B. [Bet01], [Bla07], [Böc04], [FeP02], [Lec09], [OBD09], [Pas04], [Sie09], [SKK07], [SpA06] entnommen werden.

### **2.5.3 CFD-Einstellungen (Pre- und Postprocessing)**

Zur Durchführung einer numerischen Strömungssimulation muss das betrachtete Fluidvolumen (i.d.R.) in ein Netz finiter Elemente (i.d.R. in finite Volumina) diskretisiert werden. Solche Finite-Volumen-Netze können aus verschiedenen Elementformen erstellt werden. Es wird in strukturierte und unstrukturierte Netze sowie nach der Elementform unterschieden. Gebräuchlich sind Tetraeder-, Quader-, Wedges- und Hexaeder-Elemente. Die Größe und die Form der Netz-Elemente können einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisqualität ausüben, so dass eine Diskretisierungsanalyse zur Sicherstellung der Ergebnisse durchgeführt werden muss.

Nachdem die Geometrie diskretisiert worden ist, erfolgt die Festlegung der Randbedingungen zur Charakterisierung des Strömungsproblems. Dazu werden definiert:

- Einlassöffnungen
- Auslassöffnungen
- Berandungen
- Interne Flächen
- Symmetrien

Diese mit dem zu berechnenden Fluidvolumen in Kontakt stehenden Flächen bekommen die Randbedingungen (z. B. Druck, Temperatur, Volumenstrom) aufgeprägt, die der Solver zur Lösung des Gleichungssystems verwendet. Die Lösung des Gleichungssystems wird anschließend durch Berechnungsparameter gesteuert. Insbesondere die Konvergenzkriterien sowie die Anzahl der durchzuführenden Iterationen haben einen signifikanten Einfluss auf die Qualität

der Ergebnisse, aber auch auf die Berechnungszeit, so dass eine Analyse der Konvergenzkriterien notwendig ist.

Der Solver führt die Berechnung bis zu einem gewissen Genauigkeitsgrad (Konvergenzkriterium bzw. Residuum) durch oder bis die vorgegebene Anzahl der Iterationsschritte erreicht wird. Das vorliegende Ergebnis kann mit Hilfe der im Folgenden aufgeführten Postprocessing-Methoden vom Anwender visualisiert und interpretiert werden.

Heutige Berechnungssysteme erlauben dem Anwender in der Regel mindestens die Auswertemethoden: Konturplot<sup>6</sup>, Vektordarstellung, Pfadliniendarstellung, Graphen, sowie das Auslesen von Werten entlang eines Punktes, einer Linie, einer Fläche oder eines Volumens. Das Auslesen von Werten entlang von geometrischen Elementen ist nicht immer trivial. Es existieren kommerzielle CFD-Systeme, die über sehr weitreichende geometrische Funktionen, ähnlich (oder teilweise identisch) zu denen eines CAD-Systems, verfügen. Andere CFD-Systeme bieten nur sehr puristische Methoden zur Geometriemodellierung (z.B. Punkte und Geraden über Koordinateneingabe).

Die detaillierte Vorgehensweise zur Durchführung einer Strömungssimulation sowie zur Bedienung der Postprocessing-Funktionen kann den Handbüchern des jeweilig eingesetzten Softwaresystems entnommen werden.

## 2.6 Optimierung

Der Begriff Optimierung bezeichnet den Vorgang einer Ergebnisverbesserung durch Variation von Parametern zur Erreichung eines vorgegebenen Ziels. In der Praxis werden Optimierungen durchgeführt, indem ein Problem durch Modellbildung in einen mathematisch lösbaren Zusammenhang überführt wird, welcher dann durch einen Optimierungsalgorithmus gelöst werden kann. Häufig geschieht dies in Form einer interdisziplinären Vorgehensweise zwischen Ingenieuren (Modellbildung) und Mathematikern (Lösung des Optimierungsproblems) [JaS04].

---

<sup>6</sup> Konturplot: Fehlfarbandarstellung - farbliche Einfärbung von Wertebereichen zur Ergebnisauswertung

Bei einer Optimierung werden Extremalwerte (Maxima oder Minima) einer mathematischen (reellwertigen) Funktion in Abhängigkeit von einer oder mehreren Variablen gesucht.

### Einteilung von Optimierungsverfahren

Optimierungsverfahren können, wie in Abbildung 2.11 dargestellt, in verschiedene Kategorien unterteilt werden. Die Randbedingungen des jeweilig vorliegenden Optimierungsfalles entscheiden darüber, welche der dargestellten Verfahren eingesetzt werden können.

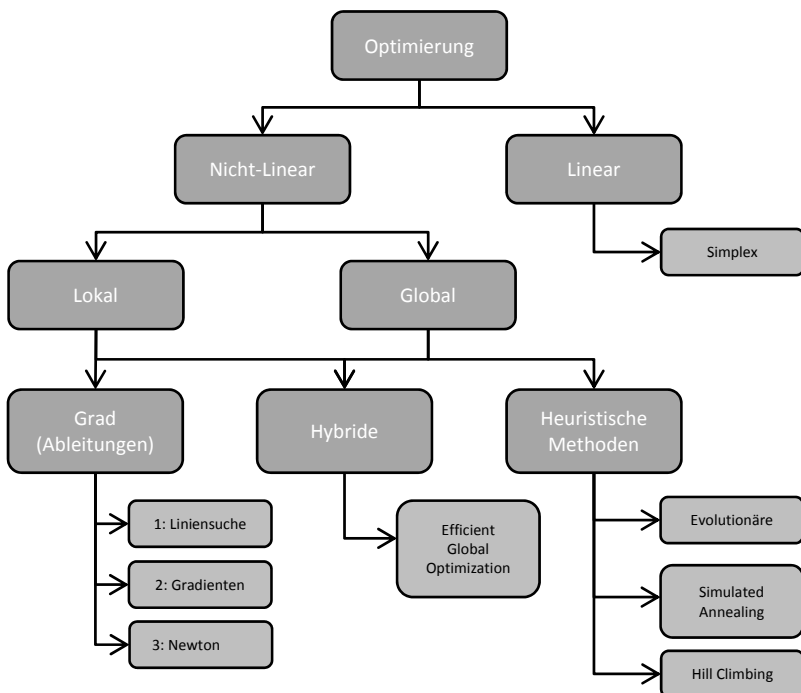


Abbildung 2.11: Übersicht Optimierungsverfahren nach [Ber11]

Für den Fall der linearen Optimierung gilt die Simplex Methode als eine häufig eingesetzte Variante zur Lösung des Optimierungsproblems [DoD05]. Bei der

Lösung eines nicht-linearen Optimierungsproblems wird zunächst unterschieden in die Suche nach einem lokalen oder globalen Optimum (vgl. Abbildung 2.12).

Zur Suche nach einem lokalen Optimum eignen sich verschiedene Verfahren, die sich nach dem höchsten Grad der eingesetzten Ableitung klassifizieren lassen. Bei einer globalen Suche werden maßgeblich die evolutionären Optimierungsverfahren eingesetzt oder an die Natur angelehnte Modelle, wie etwa das simulierte Abkühlen (simulated annealing).

Ferner existieren kombinierte, sogenannte hybride Modelle, wie das Global Efficient Optimization-Verfahren, die sowohl Teile der heuristischen<sup>7</sup> als auch Teile der deterministischen Verfahren einsetzen.

Im Folgenden werden die linearen Optimierungsverfahren nicht weiter betrachtet. Nach einer Erläuterung der lokalen und globalen Optimierung werden die grundsätzlichen Funktionsprinzipien und die Anforderungen eines gradientenbasierten sowie die eines evolutionären Verfahrens dargestellt. Die Vorstellung von Methoden zur Umwandlung einer Mehr-Ziel-Optimierung in eine Ein-Ziel-Optimierung schließt dieses Kapitel.

Eine Herleitung der zu Grunde liegenden Mathematik sowie weitere Anwendungsmöglichkeiten für Optimierungsalgorithmen können z.B. [Alt02], [Ber11], [DoD05], [GiT99], [Haf11], [JaS04], [Kos10], [Sch05], [UnD10], [Wei09], [Woh05] entnommen werden.

### **Globale und lokale Optimierung**

Innerhalb eines Optimierungsablaufes werden Variablen (Freiheitsgrade, Designvariablen) variiert und die System-Antwortfunktion (Zielfunktion) ausgewertet. In einer iterativen Vorgehensweise kann durch Variation von Parametern das Antwortverhalten des Systems berechnet werden. Als Optimierungsziel gilt das Auffinden eines lokalen oder globalen Extremum der Zielfunktion.

---

<sup>7</sup> Heuristik: Die Kunst mit begrenztem Wissen und wenig Zeit zu guten Lösungen zu kommen [GiT99]

Der Funktionsverlauf einer Funktion mit einem lokalen und einem globalen Minimum für einen diskreten Wertebereich wird in Abbildung 2.12 gezeigt. Im Wertebereich zwischen  $x_1$  und  $x_2$  befindet sich ein Extremwert (lokales Minimum) dieser Funktion. Wird der Wertebereich bis  $x_3$  erweitert, kann ein weiteres Minimum, in diesem Fall das globale Minimum der Funktion ermittelt werden. Gleiches gilt bei einer Verringerung des Suchbereiches unter den Wert  $x_1$  sowie über den Wert  $x_3$ .

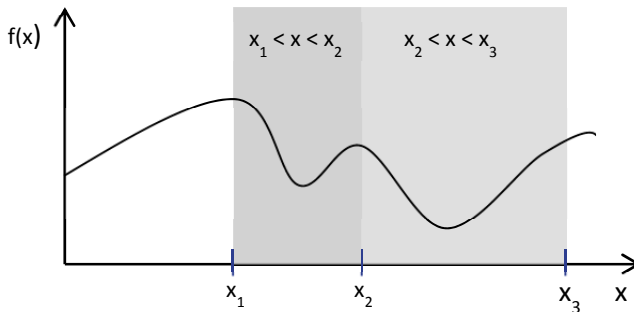


Abbildung 2.12: Optimierungsfunktion - lokale und globale Extrema

### 2.6.1 Lokale Optimierungsmethoden

Zur Suche nach einem Extremwert wird nach Nullstellen der Funktion  $f'(x) = g(x)$  gesucht. Da eine Taylorreihenentwicklung der Funktion aufgrund oft unbekannter Ableitungen höherer Ordnung nicht möglich ist, muss eine andere Methode verfolgt werden diese Nullstelle numerisch zu ermitteln. In einer iterativen Vorgehensweise wird für verschiedene Werte die Funktionsantwort berechnet und somit das Suchintervall diskretisiert. Wechselt dabei das Vorzeichen von  $g(x)$  von einem Punkt  $x_i$  zu seinem Nachbarpunkt  $x_{i+1}$ , liegt zwischen diesen beiden Punkten eine Nullstelle oder eine Singularität. Je größer die Diskretisierung erfolgt, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass einzelne Nullstellen übersehen werden.

Wechselt zwischen zwei Punkten  $x_a$  und  $x_b$  das Vorzeichen von  $g(x)$  wird der Bereich für die weitere Suche verkleinert. Dazu wird mittig zwischen den Punkten  $x_a$  und  $x_b$  die Funktionsantwort von  $x_c$  ermittelt. Ist die Funktionsantwort an der Stelle  $g(x_c)=0$



ist die Nullstelle gefunden, andernfalls werden die Grenzen so verschoben, dass zwischen der Stelle  $x_c$  und der Stelle mit umgekehrtem Vorzeichen erneut eine Wertermittlung geschieht. Auf diese Weise kann der Wertebereich kontinuierlich verkleinert werden und der Algorithmus kann sich allmählich der Nullstelle annähern.

Kann die Ableitung einer Funktion nicht gebildet werden, wird häufig die Funktionsantwort in unmittelbarer Umgebung  $x_{i+y}$  (mit  $y \rightarrow 0$ ) um den zu untersuchenden Punkt  $x_i$  berechnet und aus diesen zwei Kennwerten die Steigung bestimmt.

Die Gefahr, dass gradientenbasierte Verfahren in ein lokales Extremum laufen ist sehr hoch, folglich eignet sich diese Methode nicht zur Suche nach einem globalen Extremwert. Ferner können solche Optimierungsverfahren oft nicht eingesetzt werden, wenn die Variablen ganzzahlig angegeben werden müssen (z.B. kann die Zähnezahl eines Getriebes keinen nicht ganzzahligen Wert annehmen). Die Vorgabe von Randwerten für das Suchproblem ist notwendig [Haf11].

### 2.6.2 Globale Optimierungsmethoden

Heute eingesetzte, globale Optimierungsmethoden basieren in der Regel auf biologischen oder physikalischen Prinzipien der Natur, wie dem „simulated annealing“ (physikalisch) oder den evolutionären, genetischen oder neuronalen (biologischen) Verfahren. Im Folgenden werden die evolutionären Verfahren näher betrachtet.

Als Evolution bezeichnet man die stetige Änderung von Individuen einer Population von einer Generation zur nächsten. Dabei „überleben“ nur die stärksten Individuen, so dass in diesem Zusammenhang von Fitness gesprochen wird. Ziel der evolutionären Optimierungsverfahren ist es, durch drei verschiedene Mechanismen eine neue Generation zu erzeugen und aus dieser das „fitteste“ Individuum herauszufiltern. Die dazu eingesetzten Mechanismen sind die Selektion, die Mutation und die Rekombination. Als Selektion wird die natürliche Auslese von Individuen bezeichnet. Die Basis für die Selektion ist die Fitness des Individuums. Durch Mutation (Veränderung) wird ein Individuum entweder fitter oder schwächer wohingegen bei der Rekombination neue Kombinationen unterschiedlicher Merkmale aus verschiedenen fitten Individuen erzeugt werden.

Im Optimierungsfall wird zunächst eine zufällige Anfangspopulation gebildet und die Fitness (die Funktionsantwort) jedes Individuums (Designvorschlages) ermittelt. Im Rahmen der Selektion werden die Vorschläge hervorgehoben, die gute Ergebnisse erzielt haben und durch die Verfahren Mutation und Rekombination verändert. Dieser Vorgang wiederholt sich in einer Iterationsschleife [GKK04].

### 2.6.3 Hybride Methoden

Hybride Methoden kombinieren die Vorteile der lokalen Optimierungsmethoden (schnell, einfach) mit den Vorteilen der globalen Methoden (genau, global). Es existieren unterschiedliche solcher Kombinationen in beliebigen Komplexitäten. Einfache Varianten basieren oft auf rein stochastischen Ergänzungsverfahren. In diesem Fall wird (z.B.) durch einen Zufallswert an einer beliebigen Stelle im Designraum eine Funktionsantwort ermittelt. Ist dieser ermittelte Wert kleiner als der Wert der eigentlichen zielgerichteten Optimierung springt der Algorithmus zu dieser Position und beginnt dort die eigentliche zielgerichtete Suche von vorne.

Die Voraussetzung für den Einsatz eines solchen Verfahrens ist in der Regel die Erfüllung sämtlicher Anforderungen aller kombinierten Verfahren.

### 2.6.4 Black-Box Optimierungsproblem

Sind über die Zielfunktion keine Informationen bekannt, so dass diese nicht analytisch beschrieben werden kann, wird von einem Black-Box Optimierungsproblem gesprochen. In technischen Anwendungen, beispielsweise beim Einsatz von Simulationssoftware, ist dies häufig der Fall. Ein Black-Box Optimierungsproblem wird beschrieben über eine Menge  $S$  von zulässigen Punkten, den Variablen (Designvariablen) sowie einer oder mehrerer Zielfunktionen. Als Ziel wird das Auffinden eines Optimums definiert. Die Eigenschaften solcher Probleme werden von [Kno06], [Stö07] wie folgt beschrieben (zitiert aus [Stö07] S. 16):

- „Die Gesamtzahl der Versuchswertbestimmungen ist aus finanziellen, zeitlichen oder Kapazitätsgründen limitiert.
- Nur eine begrenzte Anzahl an Zielfunktionswerten kann zeitgleich vorgenommen werden, Parallelisierung ist nur eingeschränkt möglich.

- Das Rauschen ist gering (wiederholte Berechnungen ergeben sehr ähnliche Ergebnisse).
- Die Verbesserungen, die erzielt werden können, sind groß.
- Die Suchlandschaft ist lokal glatt, aber multimodal, sie enthält also eine große Zahl von lokalen Optima.
- Die Dimension des Suchraumes ist klein bis mittel.
- Die Probleme enthalten mehrere nicht vergleichbare Ziele.“

Ferner werden die folgenden Besonderheiten genannt: nichtlineare Nebenbedingungen, zulässige Menge oft nicht zusammenhängend (z.B. Löcher aufgrund von technischer Nicht-Machbarkeit), Auftreten diskreter Variablen, keine Gradienteninformation der Zielfunktion, fehlende Beschreibung der Zielfunktion, analytische Berechnung nicht möglich [Stö07].

Hat eine Optimierung mehr als eine Zielgröße so handelt es sich um eine **multikriterielle Optimierung**. Bei einer multikriteriellen Optimierung (oder Vektroptimierung) werden mehrere Ziele parallel verfolgt, so dass auch eine gegenseitige Beeinflussung („Entsprechen“, „Widersprechen“, „Unabhängigkeit“) möglich ist. Als Lösung liefert eine multikriterielle Optimierung somit keinen skalaren Wert („Punkt“) sondern eine „Menge“ an Lösungen, die sogenannte Pareto-Menge oder Pareto-Front. Ohne einen weiteren Vergleich kann aus der Pareto-Menge kein Optimum bestimmt werden. Innerhalb der Pareto-Menge ist jedes Ergebnis optimal, so dass ein Algorithmus nicht in der Lage ist, ein Ergebnis zu identifizieren.

Wird ein punktförmiges Ergebnis benötigt, können Verfahren angewendet werden, mit deren Hilfe multikriterielle Optimierungsprobleme in einkriterielle zu überführen sind, wie beispielsweise die gewichtete Summenmethode oder die  $\epsilon$ -Constraint-Methode. Die gewichtete Summenmethode wird im Folgenden erläutert und findet im weiteren Verlauf dieser Arbeit Anwendung.

Die **gewichtete Summenmethode** ist ein einfacher und weit verbreiteter Ansatz zur Überführung eines multikriteriellen in ein einkriterielles Optimierungsproblem. Dieser Ansatz skaliert eine Ergebnismenge in eine skalare Größe, indem jedes Objekt mit einem benutzerdefinierten Gewichtungsfaktor multipliziert wird. Die Schwierigkeit dieser Methode liegt in der intelligenten Auswahl der

Gewichtungskriterien, insbesondere wenn die Größenordnungen der einzelnen Kennwerte stark voneinander abweichen. Die Summe der Gewichtungsfaktoren sollte stets 1 ergeben. Nach einer Normierung der Zielgrößen können diese mit dem Gewichtungsfaktor multipliziert und aufsummiert werden:

$$\text{minimize } f(x) = \sum_{m=1}^M a_m f_m(x)$$

Formel 2.4: Gewichtete Summenmethode

Vorteil dieser Methode ist die einfache und intuitive Handhabung. Im Falle von gegenläufigen Optimierungsrichtungen (sowohl Maximierung als auch Minimierung einzelner Ziele) müssen alle Objekte in den gleichen Typ konvertiert werden [Stö07], [Kno06], [Kal01].

## 2.6.5 Differential Evolution

Das innerhalb dieser Arbeit eingesetzte Optimierungsverfahren ist das Differential Evolution Verfahren. Es handelt sich um einen Algorithmus zur Lösung eines Black-Box Optimierungsproblems. Die Differential Evolution Optimization (DE) wurde entwickelt von Ken Price und Rainer Storn und ist ein heuristisches Optimierungsverfahren bei dem keine Gradienten der Zielfunktionen eingesetzt werden. Die Zielfunktion muss folglich nicht differenzierbar sein, so dass diese Optimierung auch für Zielfunktionen mit starkem Rauschverhalten, Unstetigkeiten oder zeitlicher Varianz eingesetzt werden kann. Die Wahrscheinlichkeit ein globales Optimum zu finden ist bei der DE groß, wenn auch nicht 100%.

Die Funktionsweise des Optimierungsalgorithmus basiert auf den typischen Mechanismen genetischer Verfahren, der Initialisierung, Mutation, Rekombination und Selektion. Für jedes Individuum einer Population (min. 4 Individuen) wird die Fitness (Zielfunktion) ermittelt. Über die Selektion werden die Individuen mit einer hohen Fitness ausgewählt, die der nächsten Generation angehören sollen. Die Mutation verändert die Gene (Designvariablen) eines Individuums während die Rekombination verschiedene Individuen miteinander kombiniert.

Weitere Details können z.B. [Kal01], [Sto96], [StP05], [StP97] entnommen werden.

### 3. Vorarbeiten zur Automatisierung

Die Implementierung eines automatisierten Ablaufes zur Auslegung eines Extrusionswerkzeuges erfordert grundlegendes Verständnis über die Auslegung von Extrusionswerkzeugen mit Hilfe numerischer Strömungssimulationsmethoden. Dazu wurde in einem ersten Schritt eine manuelle Optimierung eines Extrusionswerkzeuges auf Basis eines Radialverteilerkonzeptes durchgeführt.

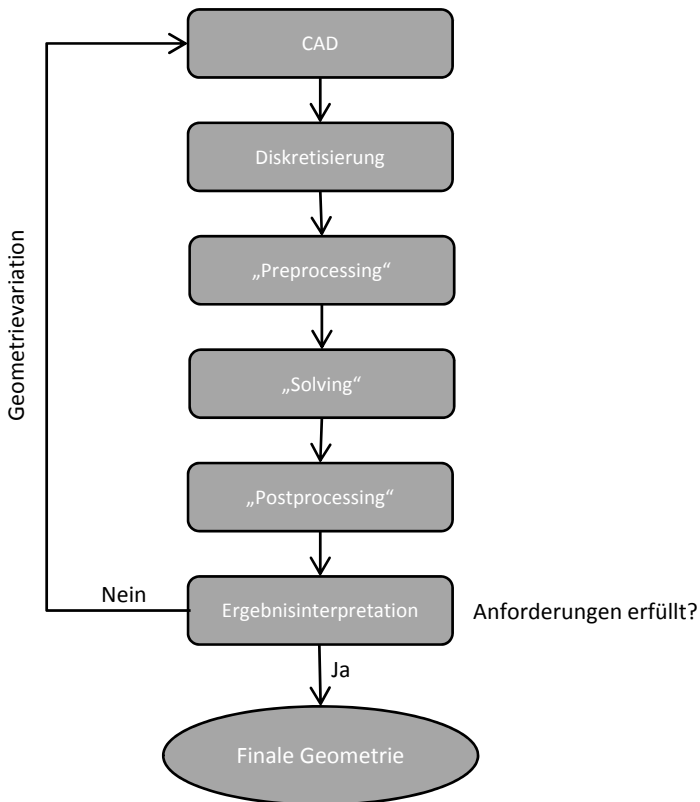


Abbildung 3.1: Manuelle Geometrieoptimierung

Der Ablauf einer manuellen (computergestützten) Geometrieoptimierung ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Zunächst wird ein 3D-CAD-Modell erstellt. Dieses Modell ist Ausgangspunkt für die Diskretisierung in das von der CFD benötigte Finite-Volumen-Netz. Anschließend folgt das Preprocessing, in dem wichtige Randbedingungen für die Berechnung gesetzt werden. Nachdem der Solver die strömungsproblembeschreibenden NSG numerisch gelöst hat, erfolgt das Postprocessing. Die Auswertung der Qualität des Designvorschlages erfolgt auf der Basis der im Postprozessor generierten Strömungsvisualisierungen.

Die Vorgehensweise der Optimierungen in der oben dargestellten Reihenfolge wird im Folgenden erläutert. Das Primärziel dieser Vorstudie ist die Erarbeitung und Verifizierung von Werkzeugqualitätskenngrößen, welche in Kapitel 4 zum Aufbau der automatisierten Optimierung eingesetzt werden können. Als Sekundärziel gilt die Auslegung eines neuartigen Radialverteilerkonzeptes, die Fertigung eines Prototypens sowie die Verifizierung der theoretisch ermittelten, optimierten Funktionsfähigkeit in realen Praxisversuchen.

Im Folgenden werden ausgewählte Stufen der iterativen Optimierung vorgestellt. Anhand von realen Praxisversuchen werden die Simulationsergebnisse verifiziert sowie die Eignung verschiedener Qualitätskriterien für eine automatisierte Optimierung überprüft.

### **3.1 Manuelle CFD-basierte Optimierungsstudie**

Zur Reduzierung der Fertigungskosten sowie des Aufwandes bei der Auslegung eines Radialverteilerwerkzeuges wird das Ziel formuliert, das Werkzeugkonzept grundlegend zu vereinfachen. Eine hohe Betriebspunktunabhängigkeit sowie gute Materialwechseleigenschaften stellen wichtige Anforderungen zur Erreichung einer wirtschaftlichen Einsetzbarkeit des Werkzeuges dar, ebenso wie ein moderater Druckverlust.

Als Ausgangsgeometrie wird ein seitlich gespeister, radialer Wendelverteiler (Radialverteiler) eingesetzt. Die Wendeln verlaufen in der Form einer archimedischen Spirale, zur Vorverteilung wird ein längenbalanciertes Vorverteilungssystem eingesetzt. Die Auslegung und Fertigung von

Radialverteilerwerkzeugen dieser Art ist aufgrund der komplexen Auslegung des Vorverteilsystems zeit- und kostenintensiv. Ein solches System zeigt oft eine hohe Betriebspunktabhängigkeit auf.

Aus Sicht der Produktqualität werden als Ziele die Vermeidung von ausgeprägten Bindenähten sowie ein homogenes Waddickenprofil formuliert. Wie in Kapitel 2 erläutert, führt die Überlagerung von in Extrusionsrichtung strömenden und in Wendelrichtung strömenden Schmelzeströmen zu einer Verwischung von Bindenähten und damit zu einer Steigerung der mechanischen sowie der optischen Eigenschaften des Produktes.

Geometriebedingt ist bei einem seitlich einspeisenden Radialverteiler mindestens eine Zusammenflussstelle vorhanden - an der Position gegenüber dem Extruderanschluss. Zur Erreichung des Optimierungsziels wird die Möglichkeit untersucht, von einem rotationssymmetrischen Aufbau der Hauptverteilung abzuweichen und stattdessen einen Verteiler zu konstruieren, der über lediglich eine Überlappung zur Vermeidung dieser obligatorischen Zusammenflussstelle verfügt. Die weitere Anpassung der Fließwiderstände wird in diesem System über ein Drosselfeld mit unterschiedlichen Spaltweiten vorgenommen. Zur Reduzierung der Auslegungs- und Fertigungskosten wird das Ausgangskonzept in mehreren Schritten vereinfacht.

In verschiedenen Iterationsstufen wurde das Vorverteilsystem umkonstruiert, die Anzahl der Wendeln reduziert und ein an Breitschlitzwerkzeuge angelehntes Verteilsystem eingesetzt (zu Breitschlitzwerkzeugen vgl. [Joh04]). Es wurde ein Werkzeug modelliert, welches über zwei auf dem Umfang verlaufende Vorverteilungsäste sowie über ein Drosselfeld verfügt, siehe Abbildung 3.2.

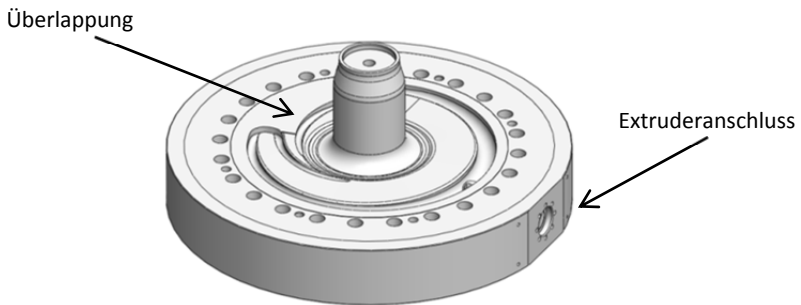


Abbildung 3.2: Werkzeugkonzept manuelle Optimierungsstudie

In der CFD-Simulation kann für dieses Werkzeugkonzept aufgrund sehr geringer Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Überlappung, siehe Abbildung 3.3 eine Stagnationszone (dunkelblauer Bereich) ermittelt werden.

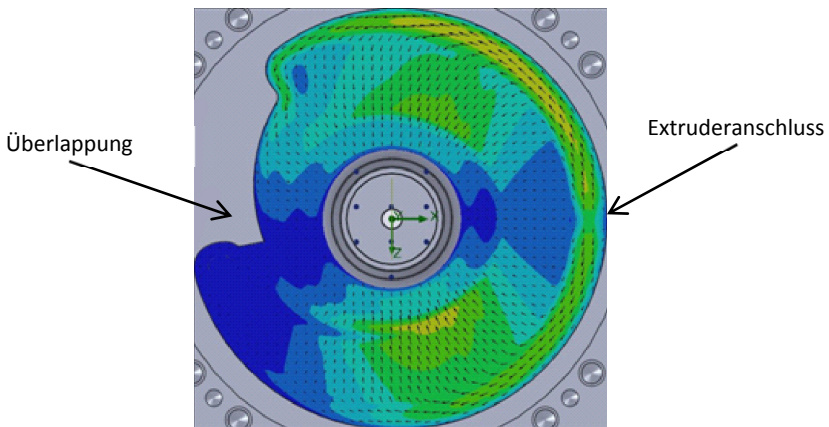


Abbildung 3.3: Kontur- & Vektorplot der Geschwindigk. (qualitat. Vgl.)

Die Vermeidung der Stagnationszone wird durch eine Variation der Geometrie erreicht, wie in Abbildung 3.4 dargestellt. Gegenüber dem Extruderanschluss kreuzen sich die Vorverteilkänäle und stellen eine Überlappung sicher, die effektiv



in der Lage ist die Bindenahtausbildung zu optimieren. Der obere, abgeschnittene Ast wird in der gegenüberliegenden Werkzeugplatte fortgesetzt. Zur Erreichung einer gleichmäßigen Geschwindigkeits- und damit Wanddickenverteilung des austretenden Extrudates wird eine Variation der Spaltweiten im Drosselfeld vorgenommen.

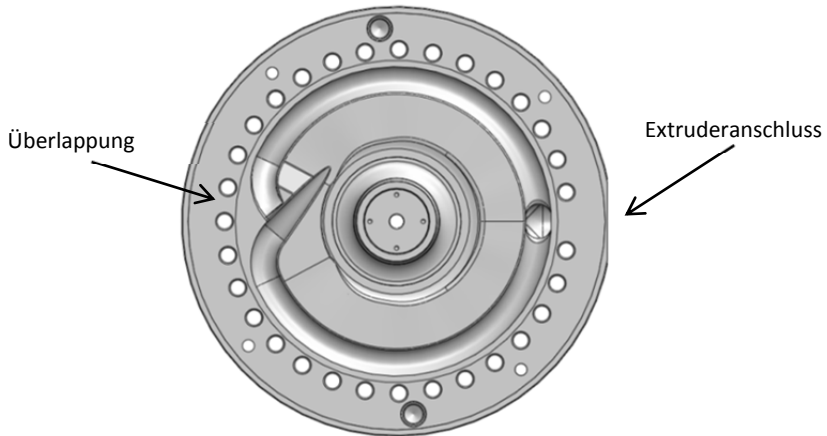


Abbildung 3.4: Finales Geometrie-konzept

Abbildung 3.5 zeigt den Konturplot der Geschwindigkeitsverteilung einer Variantenkonstruktion des finalen Geometrie-konzeptes. Erkennbar sind eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit (gelb-rot) im Bereich der Überlappung sowie eine reduzierte Strömungsgeschwindigkeit (blau-grün) im Bereich des Extruderanschlusses. Diese Bereiche werden in einer Detailoptimierung der Spaltweiten weiter angepasst, bevor die finale Werkzeuggeometrie verabschiedet wird.

Eine Explosionsansicht des aus der Optimierung hervorgegangen und für den Versuch gefertigten Werkzeugaufbaus ist Abbildung 3.6 zu entnehmen.

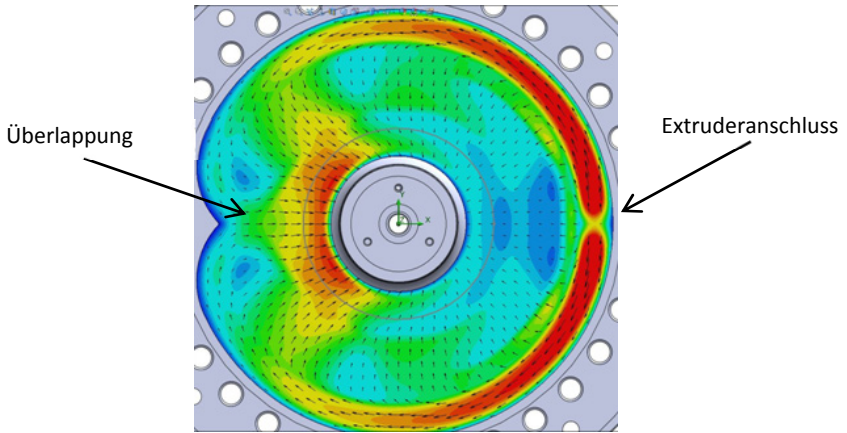


Abbildung 3.5: Kontur- und Vektorplot der Geschwindigkeit. (qualitat. Vgl.)

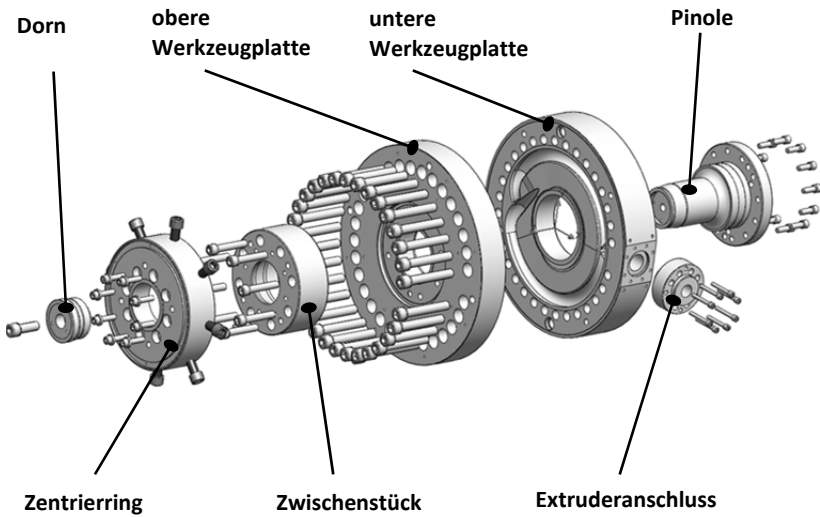


Abbildung 3.6: Explosionsansicht des Versuchswerkzeuges

### 3.2 Ableiten von Auswertemethoden

Zur Durchführung der Strömungssimulation wird von einer laminaren, isothermen, wandhaftenden Schmelzeströmung mit einer definierten Temperatur an der Einspeisung sowie Umgebungsbedingungen am Werkzeugaustritt ausgegangen. Die das Fluidvolumen begrenzenden Wände werden als isotherm definiert und erhalten als Temperaturrandbedingung die gleiche Temperatur wie das Fluid.

Zunächst wird im Rahmen einer Diskretisierungsanalyse geprüft, ab welcher Genauigkeit ein Einfluss der Diskretisierung (Feinheit des Finite-Volumen-Netzes) auf das Simulationsergebnis ausgeschlossen werden kann. In einer Konvergenzanalyse werden geeignete Abbruchkriterien (Residuen) ermittelt, die eine hohe Ergebnisqualität erwarten lassen.

Zur Auswertung der CFD-Simulation werden die visuellen Auswertemethoden erweitert, so dass eine skalare Auswertung der Extrudat-Homogenität, des Schmelze-Überlappungswinkels, der Spülcharakteristik, dem Auftreten von Schmelzebruch, des Druckverlustes, der Bindahtgestaltung sowie eine Abschätzung der Verweilzeit ermöglicht werden.

Eine Besonderheit dieser manuell durchgeführten Optimierung bietet sich dadurch, dass das hier eingesetzte CFD-Softwaresystem (FlowSimulation, siehe Kapitel 7) einen Zugriff auf das CAD-System sowie auf dessen GMK ermöglicht. Folglich kann beim Pre- sowie auch beim Postprocessing auf sämtliche Features des parametrischen CAD-Systems zugegriffen werden. Punkte, Linien, Kurven oder Flächen können in das Modell zur Unterstützung der Auswertung eingebracht werden. Dieser Sachverhalt ist bei dem später zur Automatisierung eingesetzten CFD-System (Fluent, siehe Kapitel 7) nicht gegeben, so dass keine vollständige Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Vorarbeiten erfolgen kann. Das bei der manuellen Optimierung verwendete Softwaresystem ist aufgrund unzureichender Möglichkeiten zur Automatisierung für die Implementierung des Automatismus nicht geeignet. Im Folgenden werden die eingesetzten Auswertemethoden vorgestellt sowie die Besonderheiten bei deren Übertragung in den Automatismus vorgestellt.

### Wanddickenverteilung

Auf der Basis der Geschwindigkeitskomponenten der Strömung, kann unter Zuhilfenahme von Hilfskonstruktionen ein lokaler Volumenstrom errechnet werden. Im abgebildeten Fall (Abbildung 3.7) sind fünf konzentrische, in mehrere Segmente unterteilte Kreise gleichen Radius an unterschiedlichen Höhenpositionen in den Überstromspalt an der Stelle zwischen der Hauptverteilung und dem Düsenbereich modelliert worden. Die Geschwindigkeitsvektoren werden an jedem Segment ausgelesen. Da ein Volumenstrom errechnet werden soll, werden die Flächeninhalte aneinandergrenzender Elemente bestimmt und mit den Geschwindigkeitsinformationen multipliziert.

Die daraus ermittelte virtuelle Produktdicke ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Die Absissenachse zeigt die Position im Extrusionswerkzeug anhand von Winkelkennwerten. Die  $0^\circ$  (bzw.  $360^\circ$ ) Linie verläuft durch den Extruderanschluss, folglich befindet sich der Bereich der Überlappung gegenüberliegend. Die Ordinatenachse gibt die (halbe) Dicke des austretenden Schmelzestrangs an. Die Halbierung erfolgt aufgrund der Ausnutzung von Symmetrieeffekten.

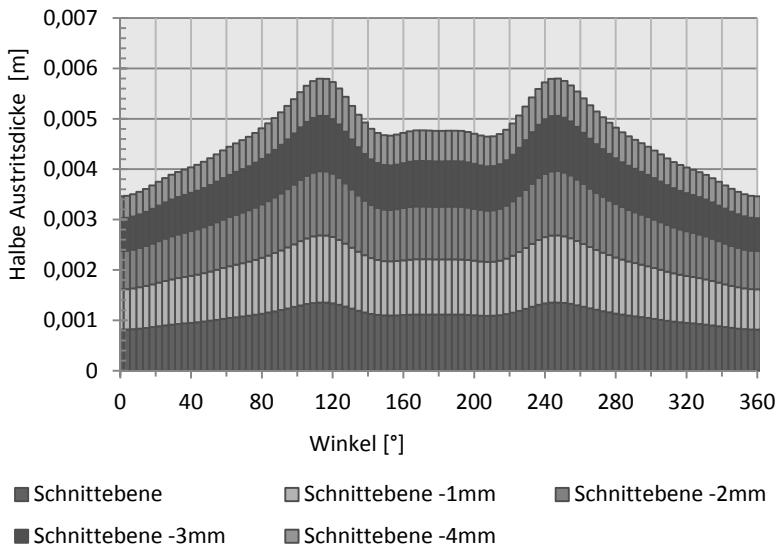


Abbildung 3.7: Darstellung eines virtuellen Dickenprofils

Die Auswertung der Wanddickenverteilung kann in den Automatismus übertragen werden. Lediglich bei der Generierung der Kreislinien treten Schwierigkeiten auf. Bei der Ableitung des finiten Volumen Netzes aus dem Geometriemodell gehen sämtliche Informationen über im Modell enthaltene Kurven verloren. Eine nachträgliche Einbringung von Kreisflächen ist in dem zur Automatisierung eingesetzten Postprozessor nicht möglich. Die Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung muss daher auf der Basis einer das Fluidvolumen schneidenden Fläche erfolgen, siehe Kapitel 4.2.

### Überlappungswinkel

In Kreisringwerkzeugen ist es zwingend notwendig, die Schmelze aufzuteilen und später wieder zusammenzuführen. Dadurch entstehen Schwachstellen im Produkt (Bindenähte), welche durch eine Überlappung von Schmelzeströmungen vermieden werden sollen. Diese Überlappung ist einer der Hauptvorteile von Verteilergeometrien wie Wendel- oder Radialverteilern.

Abbildung 3.8 zeigt das Extrusionswerkzeug sowie einen Teil der Pfadlinienvisualisierung. Farblich gekennzeichnet sind die Pfadlinien, welche nach der Aufteilung in der Vorverteilung die Pinole rechtsseitig (blau) bzw. linksseitig (rot) umströmen. Die Startflächen der Pfadlinien wurden dazu manuell in den Bereich der Umfangsverteilung eingebracht. Gegenüber dem Extruderanschluss ist der Überlappungsbereich ersichtlich, in dem die unterschiedlichen Schmelzeströmungen sich vereinen.

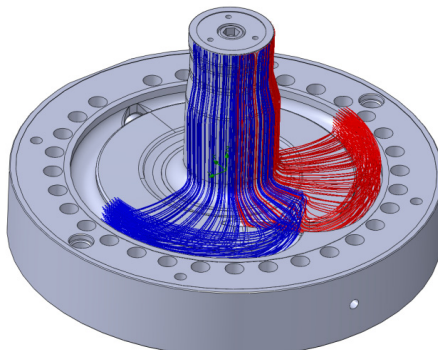


Abbildung 3.8: Überlappung von Schmelzefronten

Zur weiteren Auswertung werden die Pfadlinien (durch Stützstellen aufgespannte Splines) exportiert und eine Transformation der kartesischen Koordinaten in ein Zylinderkoordinatensystem vorgenommen. Der Pfadlinienverlauf kann Abbildung 3.9 entnommen werden.

Auf der Abszissenachse ist die Länge der Pfadlinien dargestellt. Der Startpunkt der Pfadlinien liegt an dazu erzeugten Flächen im Bereich der Umfangsverteilung (bei  $85^\circ$  und  $275^\circ$ ). Die Ordinatenachse zeigt den Winkelverlauf jeder Pfadlinie.

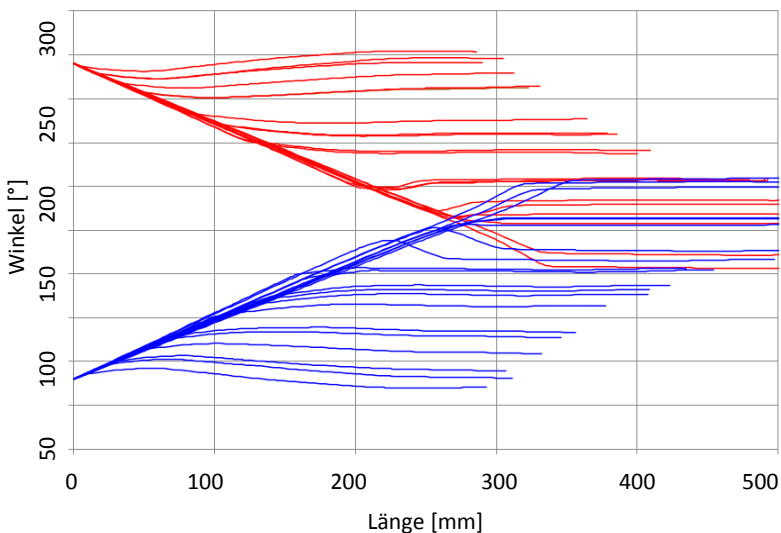


Abbildung 3.9: Verlauf der Pfadlinien

Die Auswertung des Überlappungswinkels bei der automatisierten Optimierung erfolgt analog der hier vorgestellten Methode. Die Startflächen der Pfadlinien werden dazu im CAD-Modell parametergesteuert und assoziativ eingebunden. Bei der Übertragung des CAD-Modells in das finite Volumen Netz wird das Fluidvolumen an diesen Stellen geschnitten, so dass die Flächen im Postprozessor nutzbar sind, siehe Kapitel 4.2.

### Druckverlust

Die Auswertung des Druckverlustes erfolgt durch das Auslesen der maximalen berechneten Drücke im Verteilersystem. Da das Durchströmen des Extrusionswerkzeuges auf einem Druckpotential basiert, sind die Drücke im Bereich des Extruderanschlusses maximal. Die Auswertung erfolgt somit, analog zur Auswertung im Automatismus, durch das Auslesen des Druckes auf der Einlassfläche der Schmelze.

### Spülbarkeit, Schmelzebruch

Die Auswertung des Extrusionswerkzeuges hinsichtlich des Auftretens von Schmelzebruchphänomenen sowie der Eignung des Extrusionswerkzeuges für schnelle Materialwechselprozesse findet auf der Basis der Wandschubspannungen statt. Das Überschreiten kritischer (materialspezifischer) Wandschubspannungen führt zu Schmelzebruchphänomenen, während das Unterschreiten kritischer Wandschubspannungen zur Ausbildung von Stagnationszonen führt. Die Auswertung erfolgt an allen fluidvolumenbegrenzenden Flächen, wie in Abbildung 3.10 dargestellt, über einen Datenexport sowie eine Auswertung nach Maxima und Minima sowie einen Abgleich mit kritischen Werten.

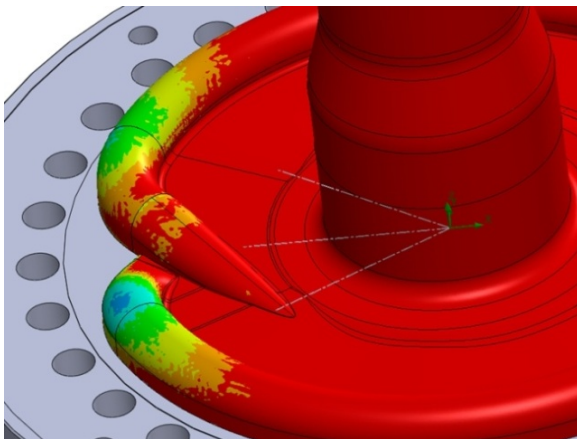


Abbildung 3.10: Konturplot der Wandschubspannungen (qualitat. Vgl.)

### Gestalt der Bindenaht

Neben der Größe des Überlappungswinkels ist auch der Verlauf der Überlappung von großem Interesse. Durch die Einbringung eines Netzes aus Stützstellen in den Bereich hinter der Hauptverteilung wird die Darstellung der Bindenahtgestalt ermöglicht. Abbildung 3.11 visualisiert die Ausbildung der Bindenaht über der Winkelkoordinate (Abszissenachse) und der Höhe in Z-Richtung des Schmelzestroms. Das Zentrum des Koordinatensystems liegt in der Rotationsachse des Werkzeuges, die Z-Achse zeigt positiv in Richtung des Schmelzeaustritts. Im Überlappungsbereich bildet ein Teil der Schmelze die später innenliegende Schicht während der andere Teil die Außenschicht ausbildet. Die Gestalt der Bindenaht wurde durch eine Hüllkurve angenähert.

Die Übertragung der Auswertung der Bindenahtgestalt in den Automatismus ist analog zu der hier vorgestellten Variante möglich. Aufgrund einer Schwerpunktsetzung auf die Auswertung des Überlappungswinkels wird die Gestaltauswertung zunächst nicht umgesetzt und erneut im Ausblick aufgegriffen.

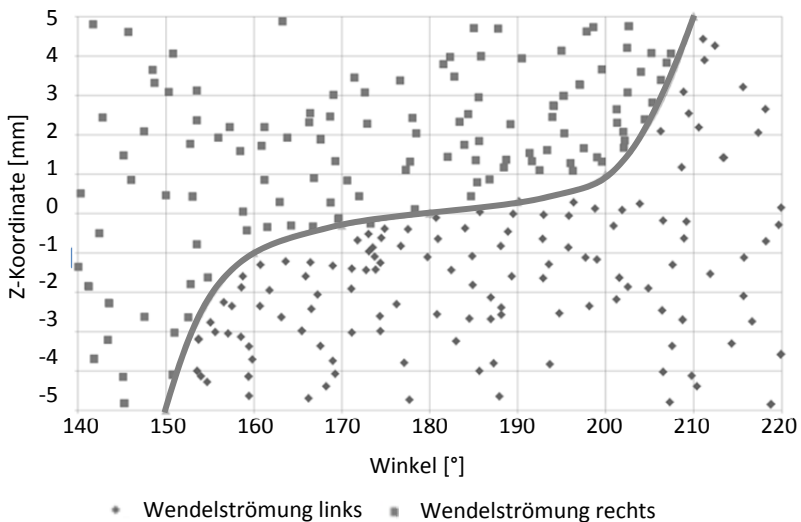


Abbildung 3.11: Visualisierung der Bindenahtgestaltung



### Verweilzeit

Die Verweilzeit der Schmelze in einem Extrusionswerkzeug hat großen Einfluss auf die Materialwechselzeiten und je nach eingesetztem Material auch einen großen Einfluss auf die Produktqualität. Abbildung 3.12 zeigt beispielhaft die rechnerisch bestimmten Verweilzeiten (Ordinatenachse) von unterschiedlichen Pfadlinien (Abszissenachse).

Pfadlinien verlaufen (bedingt durch das mathematische Prinzip ihrer Generierung) vorzugsweise durch die Werkzeugbereiche, welche hohe Fluidgeschwindigkeiten aufzeigen. Zur weiteren Auswertung der Pfadlinieninformationen müssen die Startflächen somit an geeigneter Stelle innerhalb der Geometrie platziert werden.

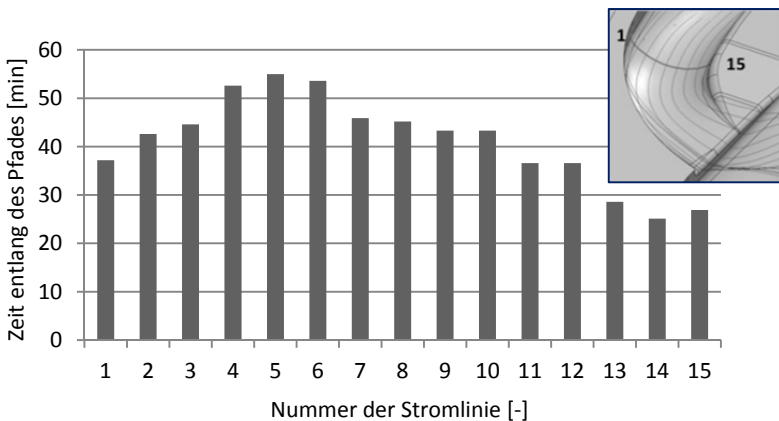


Abbildung 3.12: Verweilzeit unterschiedlicher Pfadlinien

Die Pfadlinien werden dazu manuell in die Bereiche gelegt, wo die längste Verweilzeit erwartet werden kann, in diesem Fall im Wendelgrund kurz vor der Überlappung, siehe Abbildung 3.12 (oben rechts). Die Auswertung der Verweilzeit erfolgt über die exportierten Pfadlinieninformationen. Aufgrund der Simulationsbedingung „Wandhaftung“ und somit geringen lokalen Strömungsgeschwindigkeiten resultieren hohe Verweilzeiten. Der Abstand der einzelnen Stützstellen der Pfadlinien ist zueinander bekannt, ebenso wie die lokale Geschwindigkeit an jeder Stelle der Pfadlinie, so dass sich durch Umrechnung und Aufsummierung eine virtuelle Gesamt-Verweilzeit errechnen lässt.

Bei der Übertragung dieser Auswertemethode in die automatisierte Optimierung stellt sich das Problem, dass sich die lokale Position des Bereiches minimaler Wandschubspannungen von Iterationsschritt zu Iterationsschritt verändert. Der Automatismus muss diese Stelle somit identifizieren, dort eine Startfläche für Pfadlinien generieren, die Pfadlinieninformationen exportieren und diese Werte auswerten. Die Umsetzung der Methodik wurde manuell erprobt, zeigt aber mit der eingesetzten Diskretisierungsqualität nur unzureichende Ergebnisse, so dass zugunsten einer kurzen Berechnungszeit diese Methode zunächst nicht in den Automatismus implementiert wird.

### **3.3 Verifizierung der Auswertemethoden**

Die vorgestellten Methoden zur Auswertung der Werkzeugqualität werden in Praxisversuchen verifiziert. Dazu werden zunächst der Versuchsaufbau und die durchgeführten Versuche beschrieben. Im Anschluss daran wird die Auswertung der Versuchsreihen erläutert.

Die Praxisversuche werden an einer Blasfolienextrusionsanlage des Instituts für Produkt Engineering der Universität Duisburg-Essen durchgeführt. Zur Extrusion wird ein konventioneller Einschnckenextruder eingesetzt. Als Extrusionswerkzeug wird die aus der manuellen Optimierung hervorgegangene Werkzeuggeometrie verwendet (siehe Abbildung 3.13).

Die extrudierte Folie wird von außen mit Luft gekühlt. Das Wickeln der Folie erfolgt durch einen Kontaktwickler mit konstanter Anpresskraft. Eine kapazitive Dickenvermessung wird während der Versuchsdurchführung als Inline-Messgröße eingesetzt, parallel dazu wird das Temperaturprofil der Folienblase mit Hilfe einer High-Speed Thermografie Kamera erfasst.

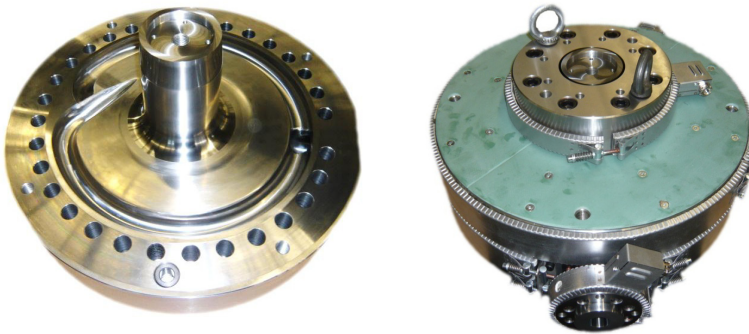


Abbildung 3.13: Prototyp – Versuchswerkzeug

Zur Sicherstellung der Abbildegengenauigkeit der Simulation werden die theoretisch ermittelten Kennwerte mit den Messergebnissen realer Praxisversuche abgeglichen. Es findet ein Abgleich der Prozessgrößen, des Überlappungswinkels, der Bindenahtgestalt sowie dem Materialwechselverhalten und der Wandschubspannungsverteilung statt.

Der **Druckverlust** innerhalb des konzeptionierten Extrusionswerkzeuges wird mit Hilfe eines Drucksensors im Bereich des Extruderanschlusses erfasst. Die Messgenauigkeit des eingesetzten Schmelzedruckaufnehmers wurde mit Hilfe einer Kalibriereinrichtung vor der Versuchsdurchführung verifiziert. Die Gegenüberstellung des simulierten Druckverlustes (in diesem Fall für ein HDPE bei einer Temperatur von 210°C) zeigt Abbildung 3.14.

Es wird der Druckverlust über dem eingestellten Betriebspunkt (Massedurchsatz) dargestellt. Die Ordinaten-Sekundärachse (rechts) zeigt den prozentualen Fehler zwischen berechnetem Druckverlust und messtechnisch erfasstem Druckverlust.

Der Fehler liegt im wesentlichen Bereich unter 10% und nimmt mit steigenden Durchsatzraten etwas zu. Dieser Verlauf lässt sich auf die Tatsache zurückführen, dass die CFD-Simulationen unter isothermen Bedingungen durchgeführt worden sind, so dass bei höheren Drehzahlen der Schnecke keine Temperaturzunahme und damit verbundene Viskositätsabnahme der Polymerschmelze berücksichtigt wurde.

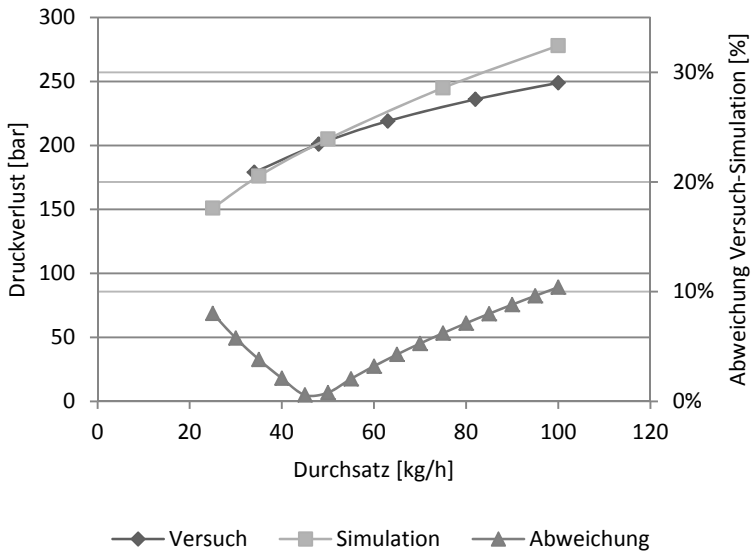


Abbildung 3.14: Druckverlustvergleich Simulation – Experiment

Zur Ermittlung der **Abbildegengenauigkeit der Pfadlinienauswertung** werden Farbwechselversuche durchgeführt und Probekörper des extrudierten Folienschlauches entnommen. Im Bereich der Überlappung wird die Bindenaht optisch ausgewertet und vermessen, wie in Abbildung 3.15 ersichtlich. Die Abbildung zeigt ein Segment des extrudierten Schlauches, bevor dieser durch den Aufblasprozess zur Folie verstreckt wurde, bei einem unvollständigen Farbwechselvorgang von schwarz eingefärbtem auf transparentes Material.

Im Bereich der Überlappung verbleibt ein Teil des Ausgangsmaterials länger als im übrigen Verteiler, so dass der Bereich der Bindenaht aus dem Experiment gut ermittelt werden kann.

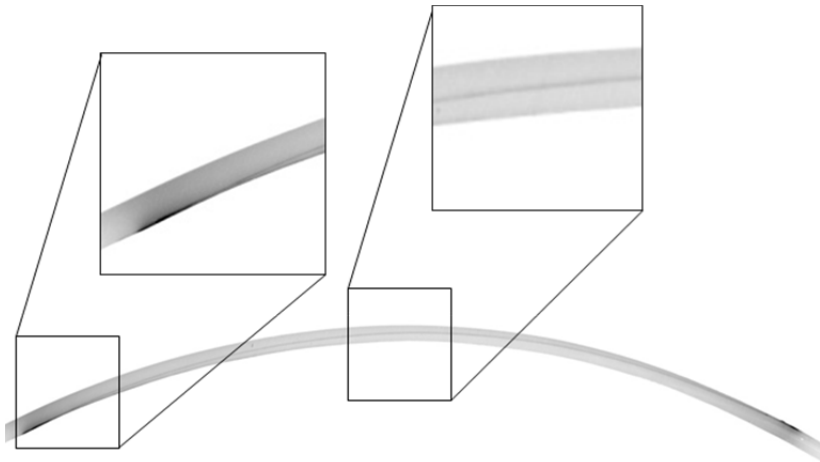


Abbildung 3.15: Probekörper zur Ermittlung des Überlappungswinkels

Zur Vermessung werden verschiedene Probekörper entnommen und der Winkel mit manuellen Messmethoden ermittelt. Die Abweichung zwischen dem Simulationsergebnis auf Basis der Pfadlinienauswertung und messtechnisch ermitteltem Überlappungswinkel ist in Abbildung 3.16 dargestellt. Bei unterschiedlichen Materialien weichen die Werte der Überlappungswinkel um maximal  $2^\circ$  ab, was einem prozentualen Fehler von weniger als 4% entspricht.

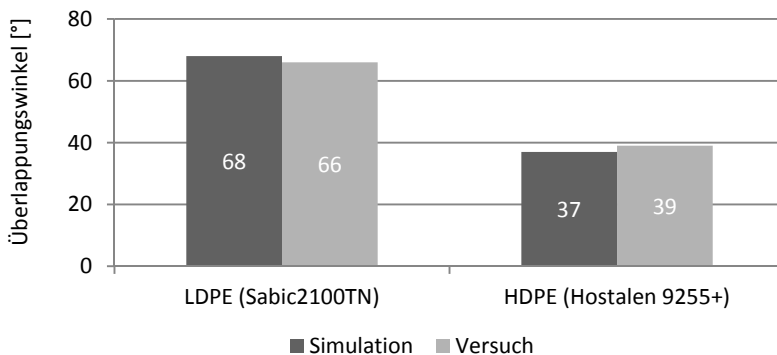


Abbildung 3.16: Überlappungswinkelvergleich Simulation–Experiment

Zur Ermöglichung eines Einblickes in das Innere der Strömungssituation wird ein **Ausbaumuster** erstellt. Dazu wird ein Materialwechsel von einem schwarz eingefärbten auf ein gelb eingefärbtes Material durchgeführt und während des laufenden Spülprozesses die Anlage angehalten. Die Werkzeugbeheizung wird deaktiviert, so dass die Schmelze im Inneren einfriert. Anschließend werden die Werkzeughälften getrennt, so dass die im Werkzeug befindliche eingefrorene Kunststoffmasse entnommen werden kann.

Das so entstandene Ausbaumuster sowie das entsprechende Simulationsergebnis (Konturplot der Wandschubspannungen) sind in Abbildung 3.17 abgebildet. Der Kern des Werkzeuges ist bereits vollständig mit gelb eingefärbtem Material gespült, während die wandnahen Bereiche noch mit schwarzem Material gefüllt sind. Insbesondere in den Bereichen, in denen durch die Simulation Zonen geringer Wandschubspannungen dargestellt werden (vgl. Grafik rechts – blaue Bereiche), zeigt das Ausbaumuster einen sehr unvollständigen Spülzustand. Dieser bereits in [Nie06] aufgestellte Zusammenhang zwischen schlechter Spülung und geringen Wandschubspannungen kann somit einhergehend mit einer guten Korrelation zwischen Simulation und Experiment verifiziert werden.

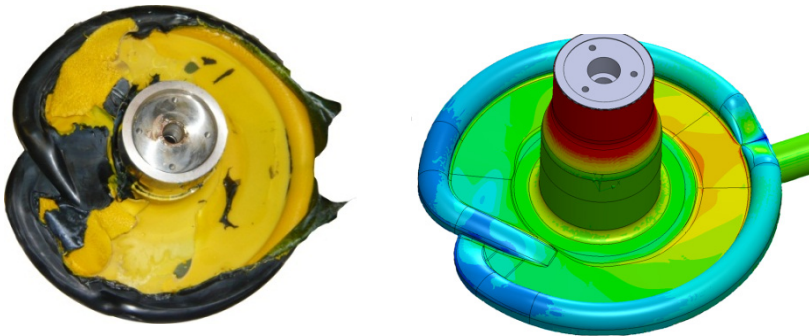


Abbildung 3.17: Ausbaumuster – Simulation Schubsp. (qualitat Vgl.)

Die schwarze Haut im Bereich des Drosselfeldes ist dünn und kann mit der oberen Werkzeugplatte abgehoben werden, so dass der Blick auf das darunter liegende, gelbe Material frei wird. Zur weiteren Auswertung wurden Schnitte des Ausbaumusters erstellt, wie in Abbildung 3.18 dargestellt. Der Verlauf der

Bindenaht in diesen Schnitten konnte mit einem identischen Schnitt in der CFD-Simulation (siehe Abbildung 3.19) exakt nachgestellt werden, so dass auch hier eine hohe Abbildegengenauigkeit zwischen Simulationsauswertung und messtechnischer Auswertung verifiziert werden kann.



Abbildung 3.18: Versuchsauswertung - Schnitt durch das Ausbaumuster

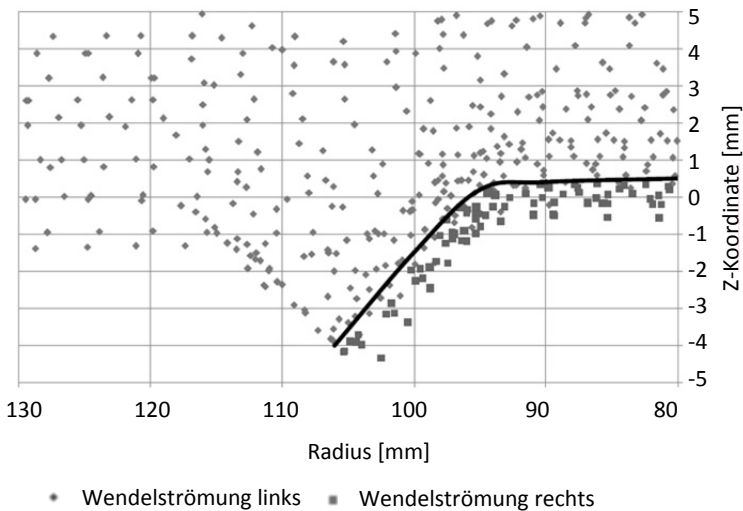


Abbildung 3.19: Simulationsvergleich – Schnitt durch das Ausbaumuster

## 4. Automatisierte Auslegung von Extrusionswerkzeugen

Die Problematik bei der Einbindung von Simulationssoftware in einen Optimierungsprozess beschreibt Prof. Hafner der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich wie folgt: *„Werden Simulationsprogramme mit Optimierungsprogrammen verbunden, so bedeutet dies, dass das Optimierungsprogramm ein Modell erzeugt und dann das Simulationsprogramm aufruft um die Eigenschaften des Modells zu bestimmen. Dabei sind stets Tausende oder Millionen von Programmaufrufen erforderlich. Die Anforderungen an das Simulationsprogramm sind hier wesentlich höher als bei der Simulation von Objekten, welche von einem Entwicklungsingenieur erzeugt wurden. Es ist zu beachten, dass das Optimierungsprogramm zum Teil absurde Modelle erzeugt, welche aber korrekt simuliert werden müssen, da sonst der Optimierungsprozess gestört wird. Die Simulationsprogramme müssen deshalb effizienter und robuster sein als dies bei den heute gängigen Programmen der Fall ist.“* [Haf11] (S.5)

### 4.1 Struktur der Automatisierungsroutine

Zur Realisierung einer automatisierten Durchführung der Werkzeugauslegung werden verschiedene kommerziell erhältliche Softwaresysteme eingesetzt und sequentiell hintereinander geschaltet. Diese „Sub-Systeme“ werden von einem übergeordneten System (im Folgenden als „Haupt-System“ bezeichnet) gesteuert und geregelt, wie in Abbildung 4.1 dargestellt.

Nach dem Aufruf eines Sub-Systems durch das Haupt-System wird diesem eine (in einer für das jeweilig eingesetzte System kompilierbaren Programmiersprache) implementierte Programmroutine übergeben. Diese Programmroutine wurde zuvor durch das *Haupt-System* so variiert, dass die notwendigen Variationen bereits in dieser enthalten sind. Das aufgerufene Sub-System arbeitet die in diesem Programmcode definierten Prozessschritte ab, exportiert die Ergebnisse in eine Datei und wird anschließend vom *Haupt-System* beendet, so dass der nächste Prozessschritt gestartet werden kann.



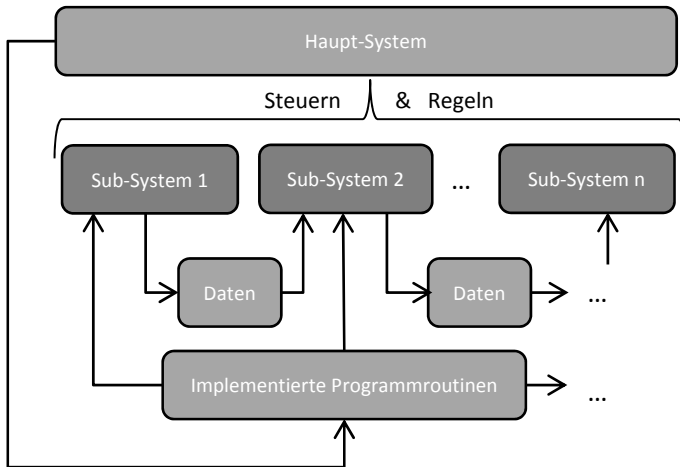


Abbildung 4.1: Struktur der Programmsteuerung

Bei der automatisierten Auslegung eines Extrusionswerkzeuges werden verschiedene Stufen des Auslegungsprozesses vollständig automatisiert durchlaufen. Die Stationen sind in Abbildung 4.2 dargestellt und im folgenden Kapitel näher erläutert.

Der Gesamtprozess erfolgt iterativ in den Stufen:

1. Automatisierte Variation des 3D-CAD-Modells
2. Automatisiertes Meshing
3. Automatisiertes Preprocessing
4. Automatisiertes Solving
5. Automatisiertes Postprocessing
6. Automatisierte Auswertung der Werkzeugqualität
7. Vorschlag neuer Designparameter (Optimierungsalgorithmus)

Zur Berechnung der Betriebspunktunabhängigkeit werden die Schritte (3), (4), (5) und (6) wiederholt. Bei der automatisierten Geometrieoptimierung wird der Gesamtprozess um die die Schritte (1) und (2) erweitert.

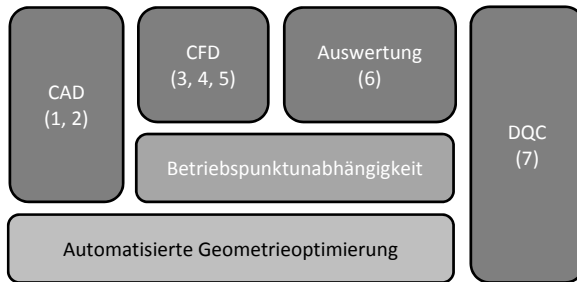


Abbildung 4.2: Struktur der Automatisierung

Im Folgenden werden die verschiedenen Stufen der automatisierten Optimierung im Detail vorgestellt. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einer Vorstellung der Optimierungsergebnisse. Die Automatisierung erfolgt, abweichend von der zuvor durchgeführten manuellen Optimierung, auf der Basis der Auslegung eines zylindrischen Wendelverteilersystems.

## 4.2 Geometriemodell

Das Geometriemodell ist die Ausgangsbasis für sämtliche Iterationsschleifen. Ziel der Geometrieerstellung ist der Aufbau eines vollständig parametrischen, voll assoziativen 3D-CAD-Modells einer universellen Wendelverteilergeometrie. Die Besonderheit dieses Modells ist, dass aufgrund der Assoziativität die Platzierung von neuen geometrischen Elementen oder Komponenten uneingeschränkt in Beziehungen zu anderen Elementen erfolgen kann. Das Modell besitzt so eine Wissensbasis, die eine intelligente (z.B. über Abfragen gesteuerte) automatisierte Modellierung ermöglicht. In der Praxis bedeutet dies, dass im Falle einer Geometrievariation (z.B. der Wendelanzahl) automatisiert davon abhängige Features (z.B. die Sternvorverteilung) angepasst werden [ipe05 – CAE].

Das Modell kann über die Veröffentlichung von Geometrieparametern einfach und robust variiert werden, ohne dass der Anwender in die zugrunde liegenden Modellierungsmethoden eingreifen muss. Auf diese Art und Weise, kann der Optimierungsalgorithmus Designvariablen der Geometrie direkt innerhalb des CAD-Modells verändern.

Die Geometrieparameter der CAD-Modellierung werden in die zwei Kategorien Gestaltungsparameter und Optimierungsparameter unterteilt. Die Gestaltungsparameter werden zur Erzeugung des Initialmodells vom Anwender vorgegeben. Daraus modelliert das 3D-CAD-Modell automatisiert die Ausgangsgeometrie des Wendelverteilers. Die Optimierungsparameter werden dem Optimierungssystem freigegeben, so dass diese (in gewissen Grenzen) frei variiert werden können. Theoretisch kann jeder Gestaltungsparameter auch als Optimierungsparameter eingesetzt werden. In der Praxis führen jedoch Randbedingungen wie beispielsweise der zur Verfügung stehende Bauraum oder das maximale Budget schon zu Einschränkungen, die der Optimierer nicht kennen kann.

Insgesamt verfügt das 3D-CAD-Modell über die folgenden freien Geometrieparameter zur Modellierung beliebiger Wendelverteilergeometrien:

- Bauhöhe
- Durchmesser
- Breite der Wendelkanäle (Fräsergeometrie)
- Kontur des Wendelkanals (Fräsergeometrie)
- Anfangskanaltiefe der Wendelkanäle
- **Tiefenverlauf der Wendelkanäle**
- Anzahl der Wendelkanäle
- Anfangsspaltweite des Überstromspaltes
- **Spaltweitenverlauf des Überstromspaltes**
- Endspaltweite des Überstromspaltes

Die fett gedruckten Parameter gelten im Folgenden als Optimierungsparameter (Design-Variablen) des Systems, da hier das Vorhandensein eines Optimums wahrscheinlich ist, siehe Kapitel 2.3.

Die grundlegende Modellierungsstrategie ist in Abbildung 4.3 dargestellt und basiert auf der Modellierung von **Volumenkörpern**. In einen rotationssymmetrischen Grundkörper werden die Wendelkanäle eingebracht. Die Bohrungen der Vorverteilung werden sternförmig in Richtung des Extruderanschluss modelliert. Die Parameter Bauhöhe und Durchmesser steuern direkt die Geometrie der dargestellten Grundkörper.

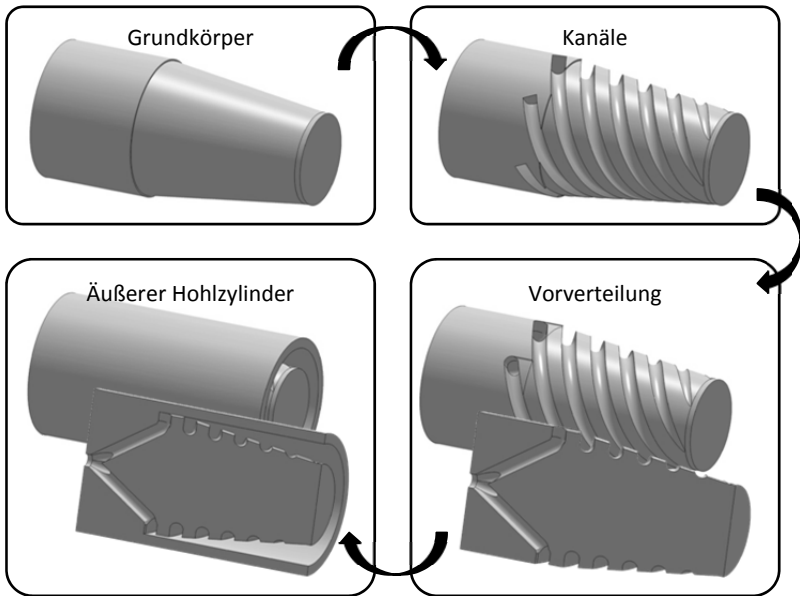


Abbildung 4.3: Modellierungsstrategie des Versuchswerkzeuges

Der Verlauf der Wendelkanäle wird über eine Leitkurve definiert. Diese Leitkurve kann über veröffentlichte Parameter variiert werden, so dass eine Anpassung der Wendelkanaltiefe realisiert werden kann, ebenso wie der Parameter für die Anfangskanaltiefe. Die Kanaltiefe am Ende der Wendel ist im CAD-Modell festgelegt, so dass ein Auslauf bis auf den Kerndurchmesser des Dorns erfolgt.

Die Festlegung der Form des Wendelkanals erfolgt (in Anlehnung an die reale Fertigung dieser Kanäle durch das Fertigungsverfahren Fräsen) über die Definition eines virtuellen Schaftfräasers, der über die Breite des Fräasers und den Radius des Fräasers definiert wird, wie in Abbildung 4.4 dargestellt. In den durchgeführten Versuchen wurde der Fräseradius auf die halbe Wendelbreite definiert, so dass die Kontur eines Kugelfräasers angenommen wurde.

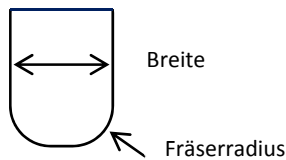


Abbildung 4.4: Kontur des virtuellen Schaftfräasers

Das dargestellte virtuelle Fräswerkzeug fräst entlang der im 3D-CAD-Modell definierten Bahnlinie die Wendelkanäle in den Dorn (siehe Abbildung 4.5). Die Kontur des Schaftfräasers steht stets senkrecht zur Steuerkurve und normal zur Hauptachse des Dorns. Die Bahnlinie wird parametrisch über den vom Automatismus vorgegebenen Wendeltiefenverlauf gesteuert.

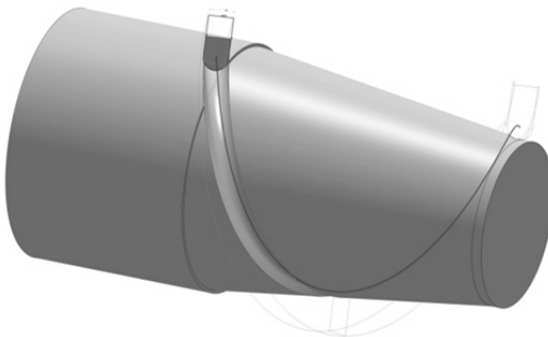


Abbildung 4.5: Bahnlinie für den virtuellen Schaftfräser

Der Verlauf der Wendeltiefe über der Bauhöhe ist in Abbildung 4.6 im Schnitt dargestellt und zeigt einen beispielhaften Verlauf.

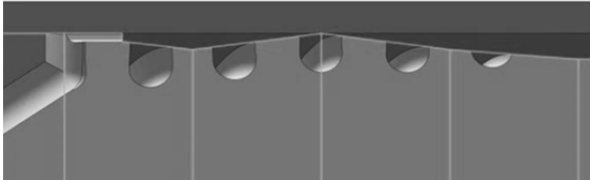


Abbildung 4.6: Gesteuerte Kontur der Wendeltiefe

Durch Musterfeatures werden ausgehend von dieser ersten Wendel die weiteren Wendeln erzeugt. Das Musterfeature verfügt über veröffentlichte Parameter, so dass die Anzahl der Wiederholungen und damit auch die Anzahl der Wendeln sowie der Abstand zueinander frei parametrisiert werden kann.

Die Spaltweite des Überstrombereiches wird durch die Definition einer Anfangsspaltweite, Endspaltweite sowie über einen parametrischen Spaltweitenverlauf gesteuert. Das Modell ist dazu segmentiert und generiert die Spaltweite zwischen zwei Segmenten durch einen linearen Spaltweitenverlauf. Die Segmentanzahl ist in diesem Modell zunächst auf fünf begrenzt, kann aber nahezu beliebig erhöht werden.

Auf Basis der hier vorgestellten Geometrieparameter wird der Wendelverteiler modelliert. Die gezeigten Features v dabei die Grundkonfiguration des Systems. Der so konfigurierte Wendelverteiler stellt die Ausgangsbasis für weitere Detaillierungen dar, die durch automatisiert ablaufende Prozeduren modelliert werden. Als Beispiel sei hierbei die parametrisch, assoziative Modellierung der Dichtflächen und des Überstrombereiches unmittelbar hinter dem Wendelauslauf genannt, wie in Abbildung 4.7 dargestellt.

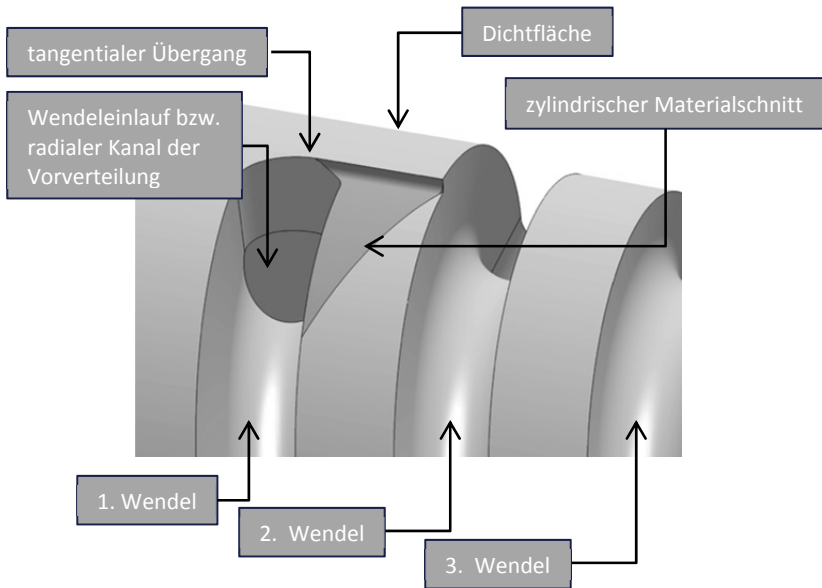


Abbildung 4.7: Modellierung der Dichtflächen und des Überstromspaltes

Das 3D-CAD-Modell bildet in dieser Arbeit die Basis für den gesamten Optimierungsprozess. Wie in Kapitel 2.5.3 beschrieben, kann die Auswertung der Simulationsergebnisse (z.B.) durch das Auslesen von Werten entlang geometrischer Elemente erfolgen. Die Modellierung solcher Elemente (insbesondere gekrümmter Formen wie Kreise, Kurven) ist im eingesetzten CFD-Softwaresystem aus zwei Gründen nicht praktikabel umsetzbar. Zum einen bietet das CFD-System keine entsprechenden Funktionen zur Modellierung dieser Elemente, zum anderen verliert das virtuelle Produktmodell bei der Übertragung der Geometrie vom CAD-System in den Preprozessor sämtliche im Modell enthaltene Intelligenz, so dass eine intelligente (auf Abfragen und Bedingungen basierende) Platzierung von geometrischen Elementen unmöglich wird (vgl. Kapitel 2.4.2).

Eine rein koordinatenbezogene Platzierung dieser geometrischen Elemente wäre zwar theoretisch möglich, würde unter Umständen aber nach einer Variation der Geometrie durch den Optimierer nicht mehr korrekt sein. Solche für die CFD-

Auswertung eingesetzten Elemente müssen folglich im CAD-Modell enthalten sein. Aufgrund der programmspezifischen Besonderheit der eingesetzten Softwaresystemkonstellation, ausschließlich für das Fluidmodell relevante Geometriedaten zu transferieren, muss die Einbringung dieser Elemente über den Umweg der **Flächenmodellierung** erfolgen. Bei dieser Vorgehensweise werden im CAD-Modell Flächen erzeugt, an denen das Fluidvolumen geschnitten wird. Das Fluidvolumen wird somit segmentiert. Die Folge daraus ist, dass diese Schnittflächen in der CFD-Simulationssoftware als „greifbare“ Flächen erkannt werden, so dass diese für weitere Operationen zur Verfügung stehen.

Zur Auswertung der Geschwindigkeitsverteilung im Auslassquerschnitt des Wendelverteilers, wird eine Ringfläche mittig im Auslassquerschnitt positioniert. An dieser Fläche kann später die Auswertung der Strömungsgeschwindigkeit über dem Umfang des Wendelverteilerauslasses erfolgen. Die Fläche wird modelliert über eine zur Wendelverteilerachse parallele Linie. Die geometrische Lage ist mittig im Strömungskanal. Durch Rotation dieser Linie um die Wendelverteilerachse wird eine Fläche aufgespannt (Abbildung 4.8).

Zur Auswertung der Pfadlinien jeder einzelnen Wendel, bei beliebiger Wendelanzahl, werden die Speisebohrungen der Wendeln durch eine halbkugelförmige Fläche geschnitten. Diese wird im Bereich des Extruderanschluss durch Vorgabe eines Mittelpunktes sowie eines Radius modelliert und ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

Jede Wendel wird in gleichem Abstand vom Extruderanschluss und unabhängig von der Anzahl der Wendeln geschnitten.



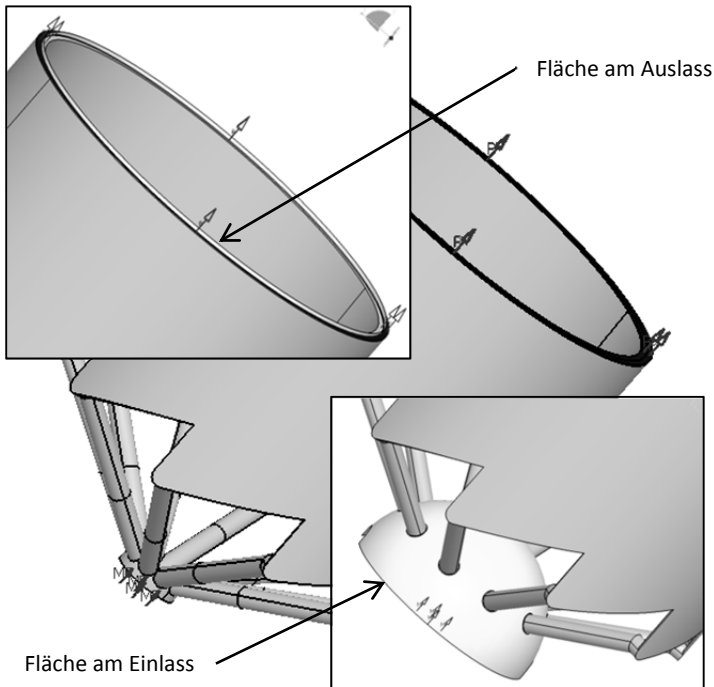


Abbildung 4.8: CAD-basierte Auswerteflächen im Fluidvolumen

Auf diese Weise generierte Wendelverteiler sind in Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10 dargestellt. Als Optimierungsmodell wird ein Mono-Wendelverteilerwerkzeug für die Extrusion von dickwandigen Rohren mit einer Bauhöhe von 300mm und einem Werkzeugdurchmesser von 350mm eingesetzt. Der Versuchswendelverteiler verfügt über eine Sternvorverteilung mit zentrischem Extruderanschluss. Die Hauptverteilung wird mit 12 Wendeln, mit einem konstanten Steigungswinkel von 25° ausgeführt. Daraus ergibt sich eine 7-fache Überlappung der Schmelzeströme sowie einem Umschlingungswinkel von 210°.

In Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10 sind verschiedene Variantenkonstruktionen dargestellt, die durch eine Parametervariation automatisiert generiert worden sind.

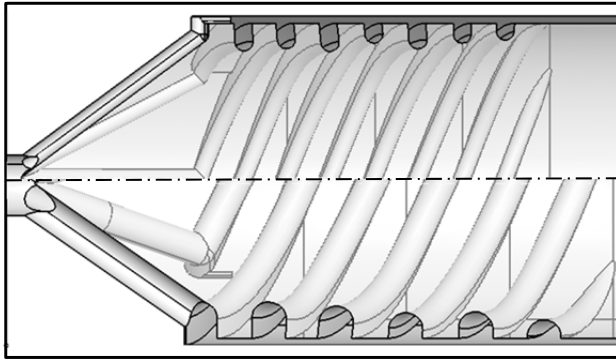


Abbildung 4.9: Verschiedene Wendelverteilerkonfigurationen

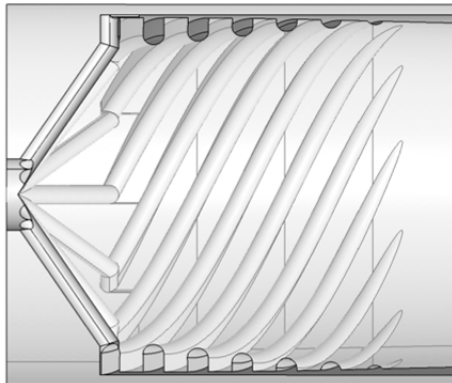


Abbildung 4.10: Variantenmodell Wendelverteilerwerkzeug

Die gesamte Variation der Geometrie wird im CAD-System durch ein implementiertes Makro auf Basis der Programmiersprache Visual-Basic vorgenommen. Das Makro wird automatisiert direkt beim Programmaufruf des CAD-Systems gestartet und steuert sequentiell sämtliche im CAD-System benötigten Features. Abschließend exportiert das Makro die CAD-Daten an den Mesher und beendet die CAD-Umgebung.

### 4.3 Design-Variablen

Das über die Geometrieparameter initiierte 3D-CAD-Modell wird während der Optimierung automatisiert durch Variation der Design-Variablen verändert. Als Designvariablen für die Optimierungsaufgabe werden der Spaltweitenverlauf sowie der Wendelkanaltiefenverlauf definiert, da hier das Vorhandensein eines Optimums wahrscheinlich ist, siehe Kapitel 2.3.

Die Optimierungssoftware übergibt einem implementierten Softwarewerkzeug insgesamt 4 skalare Parameter, aus denen das Werkzeug konkrete Kanaltiefenverläufe, sowie Spaltweitenverläufe ableitet. Die zur Auswahl stehenden Kurvenformen sind in Abbildung 4.11 dargestellt. Die Anfangsspaltweite (links) stammt aus der Vorauslegung, am Austritt des Extrusionswerkzeuges (rechts) nimmt der Spaltweitenverlauf den Offset-Wert Null an.

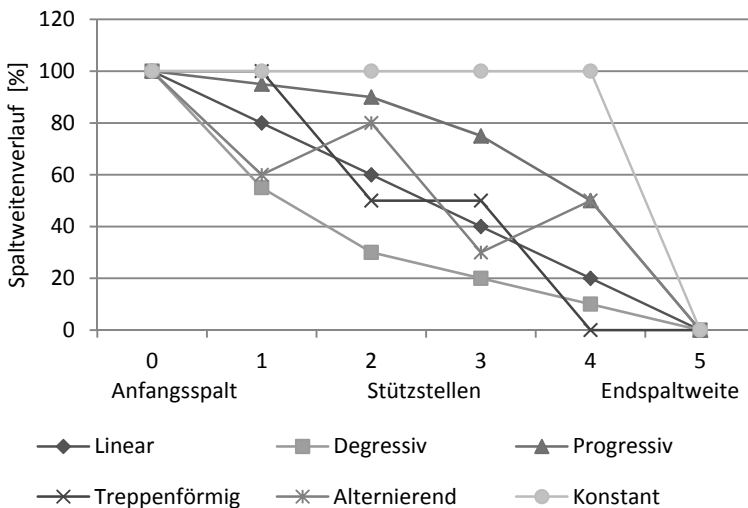


Abbildung 4.11: mögliche Kurvenformen für Spaltweite und Kanaltiefe

Insgesamt stehen 6 verschiedene Kurven zur Steuerung der Design-Variablen zur Verfügung. Es wird unterschieden in drei kontinuierliche und drei diskontinuierliche Funktionen. Die kontinuierlichen Funktionen umfassen einen degressiven,

progressiven sowie einen linearen Verlauf, die diskontinuierlichen Funktionen umfassen einen alternierenden, stufenförmigen sowie konstanten Verlauf. Die kontinuierlichen Funktionen besitzen über den gesamten Wertebereich eine Steigung mit gleichem Vorzeichen, wohingegen das Vorzeichen der Steigung einer diskontinuierlichen Funktion wechseln kann.

Die Vorgabe von konkreten Kurvenverläufen anstelle einer freien Variation der Designvariablen durch den Optimierungsalgorithmus wird zugunsten einer Beschleunigung des Automatismus eingesetzt, da somit unrealistische Designvorschläge bereits im Vorfeld ausgeschlossen werden können. Bei der Wahl der Kurvenformen liegt die Annahme zugrunde, dass wechselnde Vorzeichen der Steigung negative Auswirkung auf das Optimierungsergebnis besitzen, so dass diese Variante lediglich der Vollständigkeit halber einbezogen wird. Die weiteren möglichen Kurvenverläufe basieren auf einer gleichbleibenden Steigung und bilden sämtliche theoretisch möglichen Kurvenverläufe (unter Berücksichtigung einer Anzahl von 5 Stützstellen und einer linearen Interpolation zwischen den Stützstellen) ab. Zudem erleichtert die Vorgabe von konkreten Verläufen die Auswertung der Geometrie vorschläge, da somit der grundlegende Kurvenverlauf direkt ersichtlich ist.

Zur Variation der Geometrie werden die 4 Designvariablen eingeführt:

$W_K$  = Kurvenform des Wendeltiefenverlaufes

$W_F$  = Faktor zur Skalierung der Wendeltiefenverlaufs

$S_K$  = Kurvenform des Spaltweitenverlaufes

$S_F$  = Faktor zur Skalierung des Spaltweitenverlaufs

Die Designvariablen  $W_K$  und  $S_K$  wählen aus den 6 zur Verfügung stehenden Kurvenformen, während die Faktoren  $S_K$ ,  $W_K$  eine Skalierung der Kurven vornehmen, so dass diese in ihrer Intensität bzw. in der Lage eines Wendepunktes variiert werden können.

Ausgehend von diesen Designvariablen kann die Optimierungsfunktion wie folgt formuliert werden:

$$f(W_K, W_F, S_K, S_F) \stackrel{!}{\rightarrow} \min.$$

Formel 4.1: Unabhängige Variablen der Optimierungsfunktion

Mit Anwendung der gewichteten Summenmethode kann diese Formulierung erweitert werden zu:

$$f(W_K, W_F, S_K, S_F) = \alpha_1 * Z_1 + \dots + \alpha_n * Z_n \stackrel{!}{\rightarrow} \min.$$

Formel 4.2: Optimierungsfunktion als gewichtete Summenfunktion

mit

$$\begin{aligned} \alpha_{1-n} &= \text{Gewichtungsfaktoren} \\ Z_{1-n} &= \text{Qualitätskriterien} \end{aligned}$$

und mit

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$$

Formel 4.3: Nebenbedingung zur gewichteten Summenmethode

#### 4.4 Wahl des Optimierungsalgorithmus

Der Auswahl des Optimierungsalgorithmus werden folgende Randbedingungen zugrunde gelegt: Es handelt sich bei der vorliegenden Optimierungsaufgabe um eine nicht-lineare, globale Optimierungsaufgabe. Nach Kapitel 2.6 kommen für diese Anforderungen sowohl gradientenbasierte als auch heuristische und hybride Verfahren in Frage. Da keine analytische Beschreibung der Zielfunktion vorliegt (Black-Box-Optimierung) können gradientenbasierte Optimierungsverfahren hier nicht sinnvoll eingesetzt werden. Eine weitere Einschränkung erfolgt durch die

Vorgabe diskreter Designvariablen, so dass letztlich nur heuristische Methoden für die Optimierungsaufgabe eingesetzt werden können.

Als genetisches Optimierungsverfahren wird das Verfahren „Differential-Evolution“ ausgewählt. Im Vergleich der verfügbaren Algorithmen bietet dieses evolutionäre Optimierungsverfahren eine gute Wahrscheinlichkeit für das Auffinden eines globalen Extremwertes in einem entsprechenden Zeitintervall. Zudem zeigt das Verfahren Vorteile bei wechselhaften Funktionen, die im vorliegenden Optimierungsfall aufgrund der sprunghaften Änderung der Kurvenformen erwartet werden können.

#### **4.5 Automatisierung der CFD-Simulation**

Jeder Designvorschlag (oder das Initialmodell) wird aus dem CAD-System exportiert und an das Vernetzungsprogramm transferiert. Im CFD-Preprozessor (und Mesher) wird aus der modellierten Extrusions-Werkzeuggeometrie zunächst das Fluidvolumen (siehe Abbildung 4.8) für die Strömungssimulation abgeleitet. Bei der hier vorgestellten Methode wird ein Preprozessor eingesetzt, der in die Umgebung des CAD-Systems integriert ist und auch auf einige Funktionen des Geometrikerns zugreifen kann, so dass die Ableitung des Fluidvolumens vereinfacht wird. Das so extrahierte Fluidvolumen liegt nach dessen Generierung allerdings in einer BREP-Darstellung vor, so dass sämtliche im Modell enthaltene Intelligenz an dieser Stelle nicht mehr zugänglich ist.

Das Fluidvolumen wird zur Durchführung der Berechnung in ein Netz finiter Volumen diskretisiert. Die Vernetzung erfolgt im Rahmen dieser Arbeit sowohl über eine Kombination eines strukturierten und unstrukturierten Netzes (Tetraeder + Boundary Layer) als auch über eine vollständig unstrukturierte Vernetzung. Boundary Layer sind keilförmige Elemente (Wedges), die sich besonders zur exakten Abbildung der wandnahen Schmelzebereiche eignen. Der Aufbau dieser Randschichten wird über die Anfangs-Elementgröße, die Anzahl dieser Randschichten sowie einen Wachstumsfaktor gesteuert. Der Vernetzungsalgorithmus generiert dann, ausgehend von allen Berandungen des Fluidvolumens, Randschichten und füllt das verbleibende freie Volumen mit einem unstrukturierten Tetraeder-Netz, siehe Abbildung 4.12.

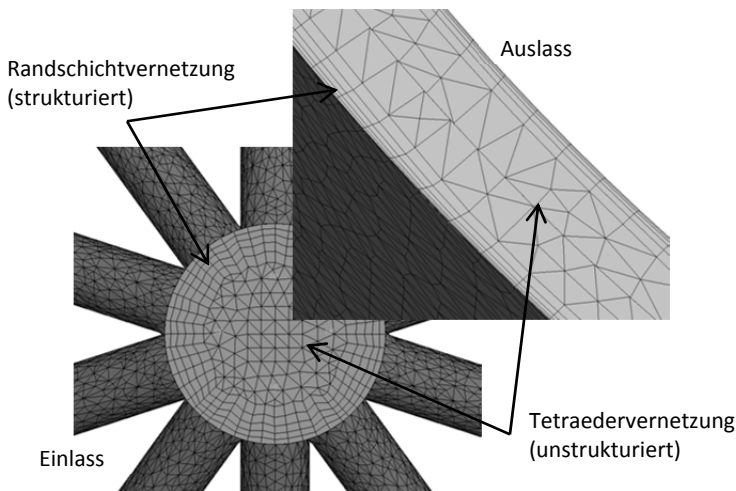


Abbildung 4.12: Hybride Diskretisierung mit Boundary Layern

Die Vernetzung unter Einbeziehung der Randschichtenmethode stellt sich im Verlauf der Arbeit als sehr genau dar, zeigt jedoch bei einigen Designvorschlägen Probleme bei der Generierung des Netzes. Im Verlauf der Optimierung der Spaltweiten- und Kanaltiefenverläufe kommt es zu Designvorschlägen, bei denen die verbleibenden Spalte in der Geometrie so eng werden, dass die Randschichten in der vorgegebenen Parametrierung nicht mehr generiert werden können. Die automatische Vernetzung bricht an dieser Stelle ab. Behoben werden kann dieses Problem, indem die Vernetzung derart fein parametrisiert wird, dass auch sehr enge Spaltweiten stabil vernetzt werden können. Die Berechnungszeit steigt dabei jedoch dramatisch an, so dass diese Methode für eine automatisierte Bearbeitung nicht zielführend erscheint.

Bei der unstrukturierten Vernetzung auf Basis von Tetraeder-Elementen stellt sich eine bei weitem höhere Robustheit des Vernetzungsvorgangs heraus. Die Ergebnisqualität leidet trotz der unstrukturierten Vernetzungsmethode nur geringfügig, so dass diese Methode als Standardmethode für die weiteren Optimierungsläufe definiert wurde. Ein Tetraeder-Netz ist in Abbildung 4.13 abgebildet.

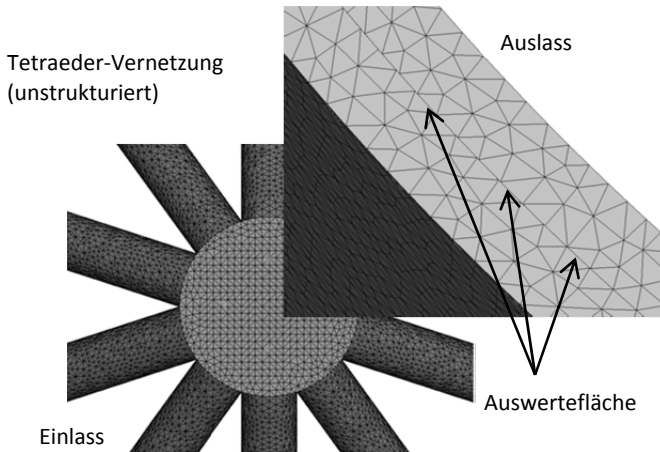


Abbildung 4.13: Unstrukturiertes Tetraeder-Netz

Das erzeugte finite Volumen Netz wird in eine Datei exportiert. Die gesamte Steuerung der Extraktion des Fluidvolumens aus dem CAD-Modell, der Vernetzung sowie der Export der Daten erfolgt über ein implementiertes Makro auf Basis der Programmiersprache Visual Basic. Nach Abschluss dieser Routine wird die Vernetzungsumgebung beendet und es erfolgt eine Informationsweitergabe an das Haupt-System über die Beendigung dieses Prozessschrittes.

Das Haupt-System prüft, ob die benötigten Daten vorhanden sind und startet (im positivem) Fall die CFD-Software (Sub-System). Die Stand-Alone-CFD-Software bietet ausgehend von der diskretisierten Geometrie sämtliche (hier benötigten) Methoden des Preprocessing, Solving und des Postprocessing. Die diskretisierte Geometrie des Fluidvolumens wird eingelesen und es werden zur Berechnung notwendige Spezifikationen definiert. Darunter fallen (z.B.) die Vorgabe des Materialmodells, der zu lösenden Gleichungen, des Eintrittsmassestrom, der Fluidtemperatur, sowie die Vorgabe von Konvergenzkriterien.

Nach Abschluss dieses Preprocessings wird die Berechnung gestartet. Das CFD-System löst das strömungsproblembeschreibende Gleichungssystem numerisch, bis der - über die Konvergenzkriterien - definierte Genauigkeitsgrad erreicht ist.



Zur weiteren Auswertung und Interpretation der Qualität des Designvorschlages werden aus den berechneten Ergebnissen Daten exportiert.

Die Auswertung erfolgt auf der Basis der in Kapitel 3 vorgestellten und durch Praxisversuche verifizierten Auswertemethoden von CFD-Simulationen. Die Auswertung erfolgt wie unten beschrieben. Der Export findet jeweils in eine ASCII-Datei (American Standard Code for Information Interchange) statt.

Zur Auswertung des **Druckverlustes** innerhalb des Extrusionswerkzeuges wird an der Einlassfläche des Fluidvolumens der Mittelwert aller angrenzenden Elemente gebildet und dieser in eine ASCII-Datei geschrieben.

Die Auswertung der **Geschwindigkeitsverteilung** erfolgt an der in das CAD-System implementierten Ringfläche in der Mitte des Austrittsquerschnittes. Entlang dieser Fläche wird der Geschwindigkeitsvektor jedes angrenzenden finiten Elementes in tabellarischer Form exportiert.

Zur Auswertung der **Wandschubspannungen** werden an sämtlichen fluidbegrenzenden Flächen die Elementwerte der Wandschubspannungen exportiert.

Der **Überlappungswinkel** wird auf der Basis der Pfadliniendarstellung ermittelt. Dazu werden an den bereits im CAD-System definierten Flächen in jeder der  $n$  Speisebohrungen die Verläufe von Pfadlinien berechnet. Der Verlauf einer Pfadlinie definiert sich über eine Kurve mit Stützstellen in einem kartesischen Koordinatensystem. An jeder dieser Stützstellen sind sämtliche der durch das Berechnungsprogramm ermittelten Fluidkennwerte bekannt und können exportiert werden. Zur Berechnung des Überlappungswinkels wird lediglich die geometrische Information benötigt.

Der schematische Ablauf der Prozessschritte innerhalb des CFD-Sub-Systems ist in Abbildung 4.14 dargestellt. Sämtliche Prozessschritte innerhalb des CFD-Sub-Systems werden von einer implementierten Programmroutine automatisiert durchgeführt. Als Programmiersprache wird dazu eine softwaresystemspezifische Programmiersprache eingesetzt (Journal-Programmierung).

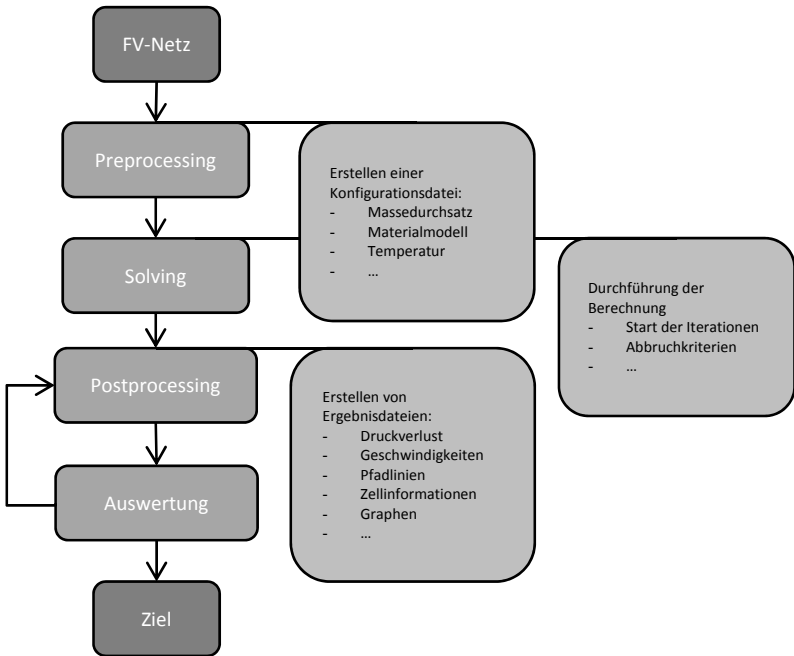


Abbildung 4.14: Einstellung im Sub-System CFD

#### 4.6 Automatisierte Ergebnisinterpretation

Die Auswertung der vom CFD-Sub-System exportierten Daten erfolgt mit Hilfe einer Tabellenkalkulationssoftware. Die exportierten ASCII-Files werden eingelesen und mit Hilfe mathematischer Methoden werden skalare Kennwerte zur Ergebnisinterpretation abgeleitet. Diese skalaren Kennwerte erlauben schließlich die Formulierung einer Zielfunktion und damit des Werkzeug-Qualitäts-Kriteriums (DQC). Im Folgenden werden die einzelnen Auswertegrößen sowie die Formulierung der Qualitätskennziffern dieser Größen vorgestellt.

Die Informationen der Wandschubspannungen werden hinsichtlich der Maxima und Minima ausgewertet. Wandschubspannungen die über einem materialspezifischen Grenzwert liegen, können nach [KDJ11] zu Schmelzebruch-

Phänomenen (z.B. Sharkskin, Orange Peel, etc.) führen. Je nach Material und Literaturquelle existieren unterschiedliche Grenzwerte für die kritischen Wandschubspannungen. Für ein HDPE werden in [KDJ11] kritische Schubspannungen zwischen  $0,1 \text{ MPa}$  und  $0,35 \text{ MPa}$  genannt.

Neben einer Höchstgrenze für die Wandschubspannungen nimmt die Vermeidung minimaler Werte eine wichtige Position ein. Bereiche sehr geringer Wandschubspannungen führen in einem Extrusionswerkzeug zu Stagnationszonen und schlechter Charakteristik des Werkzeuges für Materialwechsellvorgänge. Das in diesen Bereichen verbleibende Material kann nur schlecht vom Folgematerial aus dem System verdrängt werden, so dass der Materialwechsellvorgang durch lange Spülzeiten und damit große Mengen an Ausschussproduktion charakterisiert werden kann. Der Zusammenhang zwischen geringen Wandschubspannungen und schlechter Spülbarkeit eines Werkzeuges wird in [Nie06] belegt.

Die Formulierung des Qualitätskennwertes zur Identifikation von **Stagnationszonen und Schmelzebruch** erfolgt durch die Betrachtung der normierten Spanne zwischen Maximalwert und Minimalwert sowie durch die Berücksichtigung von Grenzwerten in einer Föppl-Klammer:

$$Z_{\tau,1} = \begin{cases} 1 & \text{für } \tau_{\min} < \tau_{\text{krit},\min} \\ \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{\tau_{\text{krit},\max} - \tau_{\text{krit},\min}} & \\ 1 & \text{für } \tau_{\max} > \tau_{\text{krit},\max} \end{cases}$$

Formel 4.4: Stagnationszonen und Schmelzebruchindikation

Für den Fall, dass die Grenzwerte des Materials überschritten werden, wird der Kennwert der Wandschubspannungen maximal ( $\text{Wert} = 1$ ). Bei einer großen Abweichung zwischen maximaler und minimaler Wandschubspannung wird der Zähler groß, so dass der Kennwert groß ist, bei einer kleinen Differenz wird der Zähler klein, so dass der Kennwert dem Optimalwert ( $\text{Wert} = 0$ ) entgegen strebt.

Auf Basis dieses Kennwertes ist keine Unterscheidung möglich, ob die Wandschubspannungen auf einem hohen Niveau oder einem niedrigen Niveau

liegen. Dazu wird ein zweiter Kennwert eingeführt, der wie folgt formuliert wird und ein Maß für die **Spülbarkeit** des Werkzeuges darstellt:

$$Z_{\tau,2} = 0,5 \cdot \frac{|\tau_{krit,max} - \tau_{max}|}{\tau_{krit,max}} + 0,5 \cdot \frac{|\tau_{krit,max} - \tau_{min}|}{\tau_{krit,max}}$$

Formel 4.5: Kennwert für Spülbarkeit

Die Gewichtung dieses Kennwertes kann gemäß den Anforderungen an das Werkzeug unterschiedlich ausfallen. Werden sehr sensible Produkte verarbeitet, kann die Forderung nach der Einhaltung der kritischen Grenzen dominieren, während in anderen Situationen zur Erreichung einer hervorragenden Spülbarkeit die Höhe des Wandschubspannungsniveaus entscheidend ist.

Die Auswertung der Werkzeugqualität hinsichtlich des **Druckverlustes** erfolgt über die Vorgabe eines maximalen Druckverlustes. Der maximal zulässige Druckverlust wird durch verschiedene Aspekte definiert. Hohe Druckverluste erzeugen in den Schmelze führenden Kanälen sowie auch im Extruder selbst höhere Verschleißraten, insbesondere bei der Verarbeitung gefüllter Polymere. Zudem kann ein hoher Druckverlust besondere Anforderungen an die mechanische Festigkeit eines Werkzeuges hervorrufen. Radialverteilerwerkzeuge besitzen große druckbelastete Flächen, so dass hohe Drücke bei dieser Werkzeugbauart zu einer Verformung der Platten und damit verbunden zu einer Leckage im Bereich des Dichtspaltes führen können. Der maximale Druckverlust für die Werkzeuggeometrie wird somit aus unterschiedlichen Gesichtspunkten vorgegeben, sollte aber in der Praxis kein hoch gewichtetes Optimierungskriterium darstellen, da bei einem sehr geringen Druckverlust in der Regel auch eine ansonsten nicht optimale Werkzeuggeometrie erwartet werden kann (schlechte Spülbarkeit aufgrund großer freier Volumina). Der Kennwert des Druckverlustes wird formuliert zu:

$$Z_{\Delta p} = \frac{p_{max}}{p_{krit.}}$$

Formel 4.6: Kennwert des Druckverlustes

Bei Druckverlusten nahe dem kritischen Druckverlust nimmt der Kennwert den Maximalwert ( $Wert = 1$ ) an, bei moderaten Druckverlusten reduziert sich der Kennwert linear.

Die Auswertung der **Wanddickenverteilung** erfolgt anhand der Geschwindigkeiten entlang einer Ringfläche im Auslassbereich des Verteilerwerkzeuges. Im Vordergrund steht, analog zur Auswertung der Wandschubspannungen, die Verteilung der Geschwindigkeit. Die Formulierung des Kennwertes erfolgt zu:

$$Z_{\Delta v} = \frac{v_{max} - v_{min}}{v_{max}}$$

Formel 4.7: Kennwert der Wanddickenverteilung

Bei einer großen Abweichung der maximalen und minimalen Geschwindigkeitsverteilung nimmt der Kennwert sein Pessimum ( $Wert = 1$ ) an. Im Optimalfall, einer sehr gleichmäßigen Geschwindigkeitsverteilung, strebt der Wert gegen Null.

Die **Verteilwirkung** des Extrusionswerkzeuges wird auf Basis der Pfadlinienauswertung vorgenommen. Betrachtet werden die Pfadlinien zweier nebeneinander liegender Wendeln und deren geometrischer Verlauf (siehe Kapitel 3). Zur Auswertung dieses Wertes in Winkelform, werden die kartesischen Koordinaten in Zylinderkoordinaten transformiert. Abbildung 4.15 zeigt den Verlauf der Pfadlinien zweier Wendeln.

Der Überlappungswinkel wird zur Formulierung des Kennwertes der Verteilwirkung herangezogen. Dieser wird definiert zu:

$$Z_W = 1 - \frac{\varphi_{max,1} - \varphi_{min,2}}{\varphi_{max}}$$

Formel 4.8: Kennwert der Verteilwirkung

Die Auswertung erfolgt aus der Differenz der am weitesten über den Umfang verlaufenden Strömung einer *Wendel 1* ( $\varphi_{max,1}$ ) und der am wenigsten umlaufenden Strömung einer *Wendel 2* ( $\varphi_{min,2}$ ). Die Normierung findet durch einen maximalen Überlappungswinkel statt. Dieser Maximalwert ist nicht universell zu beziffern, da der Überlappungswinkel sich durch eine Geometrieviation erheblich verändern kann. In den durchgeführten Berechnungen wurde der Maximalwert auf  $360^\circ$  gesetzt, so dass eine Überschreitung dieses Wertes unwahrscheinlich ist. Der Kennwert der Verteilwirkung strebt mit zunehmendem Überlappungswinkel gegen den Optimalwert (*Wert* = 0).

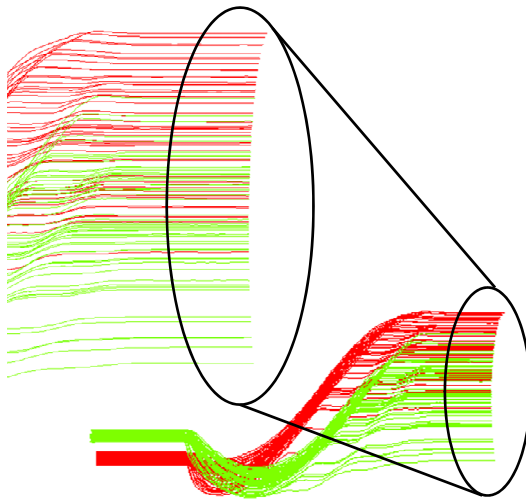


Abbildung 4.15: Pfadliniendarstellung zweier Wendeln

Die dargestellten Qualitätskennwerte werden zur Überführung dieser multikriteriellen in eine einkriterielle Optimierung in einem Werkzeugqualitätskennwert zusammengefasst.

Dieser Werkzeugqualitätskennwert (Die Quality Criterion) ist wie folgt formuliert:

$$f(W_K, W_F, S_K, S_F) = \alpha_{\tau,1} \cdot Z_{\tau,1} + \alpha_{\tau,2} \cdot Z_{\tau,2} + \alpha_{\Delta p} \cdot Z_{\Delta p} + \alpha_{\Delta v} \cdot Z_{\Delta v} + \alpha_W \cdot Z_W \stackrel{!}{\rightarrow} \min$$

Formel 4.9: Formulierung des DQC ohne Betriebspunktunabhängigkeit

Der oben aufgestellte Kennwert beschreibt die Qualität eines Extrusionswerkzeuges für einen konkreten Betriebspunkt (Massendurchsatz, Schmelzetemperatur) eines bestimmten Materials. Da in der Realität mit ein und demselben Extrusionswerkzeug jedoch häufig sehr unterschiedliche Materialien verarbeitet und Betriebspunkte angefahren werden, ist die Betriebspunktunabhängigkeit ein weiteres Auslegungskriterium, welches bei der automatisierten Optimierung des Wendelverteilers einbezogen werden soll.

#### 4.7 Betriebspunktunabhängigkeit

Die Betriebspunktunabhängigkeit eines Extrusionswerkzeuges beschreibt die Konstanz der Produktqualität in Abhängigkeit von veränderten Betriebsbedingungen, wie beispielsweise Durchsatzveränderungen, Temperaturveränderungen oder Materialvariationen. Die Betriebspunktunabhängigkeit ist ein wichtiges Auslegungskriterium, wenn das Werkzeug in einer variablen Produktion eingesetzt werden soll.

Eine Variation des Betriebspunktes führt zu einer erheblichen Veränderung der Strömungssituation innerhalb des Extrusionswerkzeuges. Eine Erhöhung des Massedurchsatzes steigert die Strömungsgeschwindigkeit der Schmelze, so dass auch die Schergeschwindigkeiten im System ansteigen. Aufgrund des strukturviskosen Materialverhaltens von Kunststoffschmelzen führen steigende Schergeschwindigkeiten zu einer Verringerung der Viskosität, infolgedessen sich die Verteilwirkung des Extrusionswerkzeuges erheblich verändern kann. Die in Bereichen hoher Schergeschwindigkeiten zusätzlich dissipierte Energie kann zu einer lokalen Verringerung der Viskosität und damit zu einem lokal geringeren Fließwiderstand führen, so dass die Verteilwirkung und auch die Geschwindigkeitsverteilung weiter beeinflusst werden.

Ein Anstieg der Reibung im System kann sich in der Überschreitung kritischer Grenzwerte der Wandschubspannung äußern und damit Schmelzebrucheffekte hervorrufen sowie den Druckverlust im Werkzeug erhöhen. Darüber hinaus kann der erhöhte Druckbedarf zu Verformungen des Extrusionswerkzeuges führen, so dass Schmelze in den Bereich der Dichtflächen eintreten kann. Der Anstieg des Druckes hat jedoch keinen direkten Einfluss auf die Verteilwirkung des Werkzeuges. Zur Berücksichtigung der Betriebspunktunabhängigkeit bei der automatisierten Auslegung eines Extrusionswerkzeuges wird der Gesamtprozess um eine **zweite automatisierte CFD-Berechnung** erweitert. Der Designvorschlag des Optimierungsalgorithmus wird zunächst in einem Betriebspunkt A und anschließend in einem Betriebspunkt B untersucht. Die Designvariablen der Geometrie werden dabei nicht verändert, so dass ausschließlich der Einfluss des Betriebspunktes untersucht werden kann. Die Auswertung erfolgt für die zweite Berechnung analog zu der bereits zuvor dargestellten Vorgehensweise.

Die Wahl der zu berücksichtigenden Betriebspunkte muss für das auszulegende Verteilsystem definiert werden. Wie bereits in [LSP09], [WiF86], [Wor78] beschrieben, kann die Betriebspunktabhängigkeit in guter Näherung über eine **Variation der Steigung der Viskositätsfunktion** im strukturviskosen Bereich ausgewertet werden.

Die Ermittlung der Betriebspunktunabhängigkeit erfolgt somit über die Definition virtueller Materialien, so dass ein möglichst breiter Betriebsbereich abgedeckt werden kann. Die Lage der Viskositätsfunktionen dieser virtuellen Materialien ist in Abbildung 4.16 dargestellt.

Zur Orientierung sind die gemessenen Viskositätsverläufe von einem LDPE und einem HDPE ebenfalls dargestellt. Die Nullviskosität der virtuellen Materialien A und B liegen zwischen diesen Referenzmaterialien. Der für die Werkzeugauslegung interessante Schergeschwindigkeitsbereich beginnt etwa bei Werten von  $0,1/s$ . Die Viskosität der Materialien A und B ist daher so gewählt, dass sie bei  $0,1/s$  identische Werte annimmt. Für steigende Schergeschwindigkeiten nimmt die Viskosität des Materials A stark ab, während die Viskosität des Materials B ein weniger ausgeprägtes, strukturviskoses Verhalten aufzeigt.



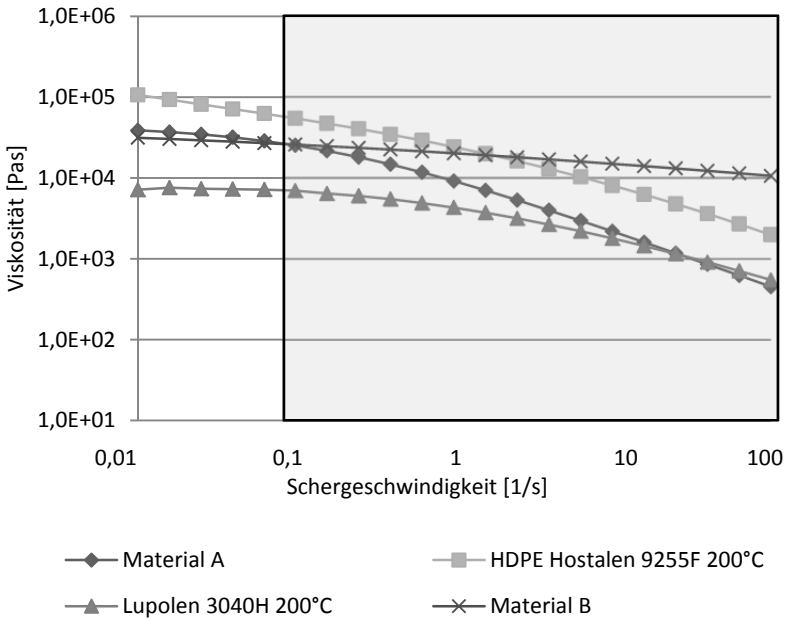


Abbildung 4.16: Viskositätskurven virtueller Materialien

Zur Auswertung der Betriebspunktabhängigkeit werden die Verteilwirkung des Werkzeuges sowie die Geschwindigkeitsverteilung der austretenden Schmelze herangezogen. Der Einfluss des Druckverlustes wird nicht in die Betriebspunktabhängigkeit einbezogen. Dieser ist zwar hoch, jedoch stellt dieser Zusammenhang in der Praxis kein Auslegungskriterium dar und ist auch durch die Geometrie nur schlecht zu beeinflussen. Das Qualitätskriterium für die Betriebspunktunabhängigkeit wird formuliert zu:

$$Z_{BP} = \alpha_{BP,1} \cdot Z_{BP,W} + \alpha_{BP,2} \cdot Z_{BP,v}$$

Formel 4.10: Kennwert der Betriebspunktunabhängigkeit

mit

$$Z_{BP,W} = \frac{Z_{W,A} + Z_{W,B}}{2}$$

Formel 4.11: Verteilwirkung – Betriebspunkt

und

$$Z_{BP,\Delta v} = \frac{Z_{\Delta v,A} + Z_{\Delta v,B}}{2}$$

Formel 4.12: Waddickenverteilung - Betriebspunkt

$\alpha_{BP,1} = \text{Gewichtung Verteilwirkung – Betriebspunkt}$

$\alpha_{BP,2} = \text{Gewichtung Waddickenverteilung – Betriebspunkt}$

Die Gewichtungparameter sind notwendig, da ein Zusammenhang bestehend aus zwei Parametern in einen ein-parametrischen Kennwert überführt werden muss. Die Wahl der Gewichtungparameter wird weiter unten beschrieben.

#### 4.8 Definition des Auslegungskriteriums (DQC)

Aufbauend auf den bereits zuvor dargestellten Teilformulierungen der verschiedenen Qualitätskenngrößen wird das Werkzeugqualitätskriterium folgt formuliert:

$$\begin{aligned} f(W_K, W_F, S_K, S_F) = \\ = \alpha_{\tau,1} \cdot Z_{\tau,1} + \alpha_{\tau,2} \cdot Z_{\tau,2} + \alpha_{\Delta p} \cdot Z_{\Delta p} + \alpha_{\Delta v} \cdot Z_{\Delta v} + \alpha_W \cdot Z_W + \alpha_{BP} \cdot Z_{BP} \xrightarrow{!} \min. \end{aligned}$$

Formel 4.13: Formulierung des Werkzeugqualitätskriteriums (DQC)

#### 4.9 Wahl der Gewichtungparameter

Bei der Überführung der multikriteriellen in eine einkriterielle Optimierungsaufgabe werden die einzelnen Zielfunktionen durch Gewichtungparameter unterschiedlich stark in das Gesamtergebnis einbezogen. Die Wahl der Gewichtungparameter beeinflusst dabei in erheblichem Maße die berechnete Werkzeugqualität. Anzustreben ist eine vollständig allgemeingültige Definition der Gewichtungparameter für unterschiedlichste Anforderungen an das Extrusionswerkzeug. Diese Allgemeingültigkeit ist in der Praxis jedoch nur schwer zu erreichen, da eine erhebliche Bandbreite an möglichen Anforderungen existiert.

In der oben gezeigten Formulierung des DQC werden insgesamt sechs Haupt- und zwei Neben-Gewichtungparameter eingesetzt, die den Einfluss unterschiedlicher Zielgrößen hervorheben bzw. abschwächen können. Die Summe der sechs Haupt-Gewichtungsfaktoren beträgt den Wert = 1, ebenso wie die Summe der zwei Neben-Gewichtungsfaktoren.

Nr.	Krit.	Auswirkung auf	Konträr zu:	Gewichtung [%]
1	$\alpha_{t,1}$	Stagnation + Schmelzebruch	-	10
2	$\alpha_{t,2}$	Spülbarkeit	$\alpha_{\Delta p}$	10
3	$\alpha_{\Delta p}$	Druckverlust	$\alpha_{t,2}$	5
4	$\alpha_{\Delta v}$	Wanddickenverteilung	-	25
5	$\alpha_W$	Verteilwirkung	-	25
6	$\alpha_{BP}$	Betriebspunktunabhängigkeit	-	25
6a	$\alpha_{BP,1}$	Verteilwirkung – BP	-	65
6b	$\alpha_{BP,2}$	Wanddickenvert. – BP	-	35

Tabelle 4.1: Gewichtungparameter und Auswirkung

In Tabelle 4.1 sind diese Faktoren sowie die von diesen direkt beeinflussten weiteren Faktoren aufgeführt. Das Auftreten von Schmelzebruch ist in keinem Anwendungsfall zulässig, so dass Kriterium 1 stets mit einer Gewichtung ungleich Null gewählt werden sollte. Stagnationszonen sind Bereiche in denen die Schmelze stagniert und nicht durch das Werkzeug hindurchströmt. Material in solchen Stagnationszonen weist erhebliche Verweilzeiten auf, die dazu führen können, dass materialinterne Phänomene (z.B. Aufbau- und Abbaureaktionen, Nachkondensation) auftreten können. Die Spülbarkeit des Werkzeuges leidet

darunter erheblich. Lediglich bei Materialien deren Verarbeitung sehr unproblematisch ist kann eine geringe Gewichtung dieses Qualitätskriteriums zugunsten einer höheren Gewichtung eines anderen Kriteriums sinnvoll sein.

Wie dargestellt, verhalten sich die Gewichtungsparameter des Druckverlustes (3) und der Spülbarkeit (2) zueinander gegenläufig. Dies liegt darin begründet, dass eine gute Spülbarkeit durch hohe Wandschubspannungen erreicht werden kann [Nie06], diese aber hohe Druckverluste erzeugen. Eine gleichzeitige hohe Gewichtung dieser zwei Parameter würde somit einen Widerspruch verursachen.

Steht die Erreichung einer hervorragenden Produktqualität im Vordergrund der Optimierungsaufgabe, kann die Erreichung einer sehr guten Wanddickenverteilung (4) sowie die Realisierung einer sehr guten Verteilwirkung und daraus resultierend einer guten mechanischen Festigkeit und optischen Produktqualität (5) in den Fokus gesetzt werden. Der Verlauf dieser Gewichtungsparameter ist nicht konträr, so dass eine gleichzeitig hohe Gewichtung sinnvoll ist.

Mit dem Gewichtungsparameter der Betriebspunktunabhängigkeit (6) kann die Einsatz-Bandbreite des Werkzeuges festgelegt werden. Insbesondere bei Werkzeugen die für unterschiedliche Produktdimensionen ausgelegt werden, ist eine gute Betriebspunktunabhängigkeit ein wichtiges Auslegungskriterium und sollte damit einen hohen Wert einnehmen.

Die zwei Nebenparameter (6a, 6b) beeinflussen die Schwerpunktsetzung bei der Ermittlung der Betriebspunktunabhängigkeit eines Extrusionswerkzeuges. Eine hohe Gewichtung des Parameters 6a hebt die Gleichmäßigkeit der Verteilwirkung in unterschiedlichen Betriebspunkten hervor, die hohe Gewichtung des Parameters 6b verbessert die Wanddickenverteilung der austretenden Schmelze in unterschiedlichen Prozessfenstern.

Der Gewichtungsparameter des Druckverlustes wurde sehr gering gewählt, da der Druckverlust sich im Wesentlichen aus den sonstigen Anforderungen an das Extrusionswerkzeug ergibt und bei einer hohen Gewichtung das Auslegungsergebnis negativ beeinflussen kann. Hohe Druckverluste können mit heutigen Möglichkeiten des Werkzeugbaus und mit zur Verfügung stehenden hochfesten Werkstoffen gut beherrscht werden, so dass die Erreichung eines

geringen Druckverlustes zwar anzustreben ist, aber nicht als Schwerpunkt der Auslegung betrachtet wird.

Die Erreichung einer guten Produktqualität und einer möglichst geringen Betriebspunktabhängigkeit rückt damit in den Vordergrund bei der Auslegung eines Extrusionswerkzeuges, so dass eine hohe Gewichtung dieser Faktoren ( $\alpha_{\Delta v}$ ,  $\alpha_W$ ,  $\alpha_{BP}$ ) für verschiedene Anwendungen und Einsatzbereiche sinnvoll ist.

Die Kennwerte der Spülbarkeit ( $\alpha_{\tau,1}$ ,  $\alpha_{\tau,2}$ ) werden mit einer geringeren Gewichtung einbezogen, so dass eine gute Spülbarkeit des Werkzeuges sichergestellt werden kann, durch diese Forderung aber die sonstigen Faktoren nicht dominiert werden.

Der Einfluss des Betriebspunktes auf die Verteilwirkung des Extrusionswerkzeuges ist sehr groß, so dass die Verteilwirkung bei der Ermittlung der Betriebspunktunabhängigkeit hervorgehoben wird.

In [Cre08] wird der Gewichtungsfaktor der Leckstromkurvenauswertung mit einem Wert von 55% am höchsten gewichtet. Die Wanddickenverteilung liegt bei einer Gewichtung von 25%, wohingegen die Gewichtung des Druckverlustes sowie der maximalen Schergeschwindigkeit nur bei 10% liegen.

Die Schwerpunkte werden somit auch von *Cretu* in den Bereich der Produktqualität gelegt und entsprechen tendenziell den hier gewählten Größenordnungen, wenn die Abbildung der Produktqualität über die von *Cretu* ausgewertete Leckstromkurve mit der hier eingesetzten Auswertung des Überlappungswinkels, der Wanddickenverteilung sowie der Betriebspunktunabhängigkeit in Analogie gesetzt wird.

#### **4.10 Verifizierung und Validierung**

Zur Prüfung der Funktion des Optimierungssystems werden verschiedene Berechnungen durchgeführt. Der Automatismus bearbeitet dabei die jeweilige Berechnungsaufgabe vollständig autark und ohne Benutzereingriff.

Folgende Ziele werden bei der Versuchsdurchführung verfolgt:

1. Sicherstellung der Funktionsweise des Automatismus
2. Ermittlung des Zeitbedarfs
3. Sicherstellung der Abbildegengenauigkeit<sup>8</sup> anhand von Korrelationsanalysen
  - a. Materialmodell
  - b. Geometrie
4. Auswertung der Qualitätskennwerte
5. Auswertung einer automatisierten Optimierung

Die **Funktionsweise** des Automatismus wird in Nominalläufen überprüft. Dazu werden dem System Designvariablen vorgegeben, welche automatisiert im 3D-CAD-Modell umgesetzt und ausgewertet werden. Anhand dieser Berechnungen wird überprüft, ob der Algorithmus in der Lage ist bei verschiedenen Designvariablen sämtliche Prozessschritte robust zu bearbeiten. Die Methodik zeigt eine stabile Funktionsweise im gesamten zur Verfügung stehenden Wertebereich der Freiheitsgrade.

Der **Zeitbedarf** einer Berechnung ist in Abbildung 4.17 dargestellt. Mit logarithmischer Skalierung wird der Zeitbedarf jedes Einzelschrittes abgebildet. Der Gesamtaufwand für die Berechnung wird direkt durch die Feinheit des Finite-Volumen-Netzes bestimmt. Im dargestellten Fall wird ein Netz mit einer Elementanzahl von ca. 2,6 Millionen Tetraeder-Elementen eingesetzt. Die Berechnungen finden auf einer Hochleistungsworkstation mit acht Kernen (2 x Xeon Quad Core) statt, wobei die CFD-Gleichungen auf vier Kernen berechnet werden. Der für die Berechnung benötigte Arbeitsspeicher lastet das Gesamtsystem zu bis zu 60% (ca. 16 GB) aus.

In absoluten Zahlen ergibt sich mit dieser Konfiguration für einen Berechnungsdurchlauf eine Zeitdauer von *1h 20min*. Der größte Anteil der Berechnungszeit wird durch das CFD-System mit etwa 74% (je Material 37%) bestimmt. Eine Parallelisierung des Prozesses ist im Bereich der CFD-Simulation möglich, da hierbei zwei verschiedene CFD-Simulationen (Betriebspunkt A & Betriebspunkt B) durchgeführt werden, die nicht voneinander abhängig sind. Die

---

<sup>8</sup> Abbildegengenauigkeit: Übereinstimmung zwischen Berechnungsergebnis des Automatismus und Realität

Parallelisierung dieser CFD-Simulationen erfordert jedoch zusätzliche Investitionen in Softwarelizenzen.

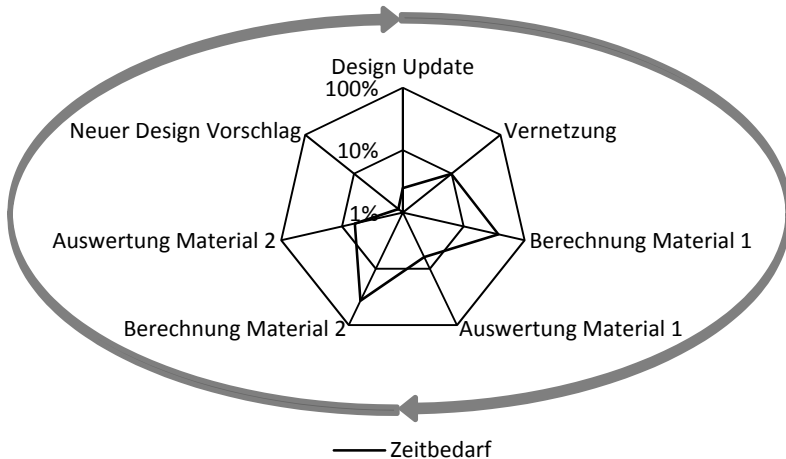


Abbildung 4.17: Zeitbedarf des Automatismus

Der aufgezeigte Zeitbedarf stellt die Berechnungszeit des Systems dar, bei der eine akzeptable Ergebnisqualität (unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Hard- und Softwarekapazitäten) erreicht werden kann. Zugunsten einer gesteigerten Ergebnisgüte kann die Qualität der Diskretisierung erhöht, oder die zulässige Größe der Residuen herabgesetzt werden, wodurch allerdings eine Verlängerung des Gesamtzeitbedarfs hervorgerufen wird. Der Gesamtzeitbedarf kann dabei sehr stark ansteigen, wobei die Berechnungsqualität ab einer gewissen Komplexität konvergiert.

Zur Sicherstellung der **Abbildegengenauigkeit** werden automatisierte Berechnungen durchgeführt und deren Ergebnisse im Rahmen von Korrelationsanalysen ausgewertet. Variiert werden dabei das Materialmodell gemäß Tabelle 4.2 sowie die Geometrie über die Variation der in Kapitel 4.3 dargestellten Freiheitsgrade. Die Einflüsse verschiedener Materialmodelle auf unterschiedliche Aspekte der Extrusionswerkzeugauslegung wurden bereits in diversen Forschungsarbeiten thematisiert (z.B. [LSP09]) sowie in Kapitel 3 anhand eines prototypischen

Werkzeugkonzeptes in Realversuchen untersucht. Eine weitere Absicherung der Ergebnisse durch Praxisversuche ist an dieser Stelle damit nicht notwendig.

	Versuch 1		Versuch 2		Versuch 3	
	A	B	A	B	A	B
<b>Nullviskosität</b> [Pa s]	<b>120.000</b>	<b>8.000</b>	50.000	50.000	45.000	50.000
<b>Übergangspunkt</b> [1/s]	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143	0,143
<b>Steigung</b> [Pa s <sup>2</sup> ]	0,38	0,38	0,38	0,38	<b>0,9</b>	<b>0,5</b>
<b>Massestrom</b> [kg/h]	500	500	<b>350</b>	<b>600</b>	500	500
<b>Anzahl</b> [-]	9	9	6	6	36	36
<b>Methode</b>	Tabelle		Tabelle		Tabelle	

Tabelle 4.2: Versuche zur Verifizierung

Die **Versuche** zur Untersuchung der Korrelationen zwischen Betriebspunkt bzw. **Materialmodell** und Berechnungsergebnis sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Untersucht werden verschiedene Extrusionswerkzeuggeometrien mit variablen Spaltweiten- und Wendeltiefenverläufen. Der Übergangspunkt (Parameter B des Carreau-Modells) wird in den Versuchen konstant gehalten. Die Variation erfolgt in *Versuch 1* über die Nullviskosität, in *Versuch 2* über den Massedurchsatz und in *Versuch 3* über die Steigung der Viskositätskurve im strukturviskosen Bereich (Parameter C des Carreau-Modells). Insgesamt werden in diesen drei Versuchen 102 CFD-Berechnungen durchgeführt und ausgewertet. Jede dieser Berechnungen generiert 38 Ergebnisgrößen auf der Basis von vier Freiheitsgraden und ca. 40 weiteren Vorgabewerten. Aufgrund des hohen Datenumfangs wird die Auswertung auf einzelne Kennwerte reduziert, wie im Folgenden dargestellt.

Ergebnisse aus *Versuch 1* sind in Abbildung 4.18 und Abbildung 4.22 anhand der Auswertung des Druckverlustes sowie des Überlappungswinkels für verschiedene Werkzeuggeometrien dargestellt. Gezeigt ist der Druckverlust für Materialien mit unterschiedlichen Nullviskositäten bei ansonsten identischen Materialparametern für verschiedene Werkzeuggeometrien (Wendeltiefenverlauf – oben, Spaltweitenverlauf – unten). Der Verlauf des Druckverlustes ist tendenziell identisch, jedoch liegt die Kurve  $dp\_A\_V1$  (*skaliert*) deutlich oberhalb des sich bei



Material B (V1) einstellenden Druckverlustes (siehe Sekundärachse), so dass diese Kurve zur vereinfachten Darstellung skaliert wurde (Multiplikation mit dem Faktor  $1/5$ ). Der Verlauf des Druckverlustes für unterschiedliche Massedurchsätze (V2) ist tendenziell ebenfalls identisch, liegt aber näher beieinander. Weder die Nullviskositätsveränderung noch die Variation des Massedurchsatzes führt somit zu einem starken Einfluss auf den Verlauf des Druckverlustes für verschiedene Geometrievarianten.

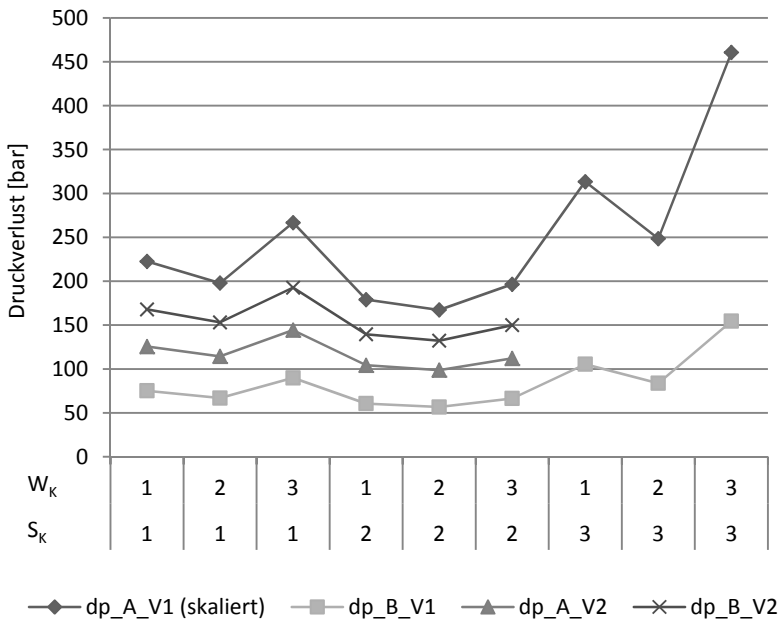


Abbildung 4.18: Versuch 1 & 2 – Druckverlust

Der größte Druckverlust im Vergleich der zwei unterschiedlichen *Versuche 1 & 2* stellt sich bei Geometrievariante ( $W_k3, S_k1$ ) ein, bei der der Spaltweitenverlauf linear abnimmt und der Wendeltiefenverlauf progressiv verläuft, siehe Abbildung 4.19. Dieser Verlauf resultiert aus den hohen Fließwiderständen aufgrund des geringen freien Volumens im Kanal und ist analytisch nachvollziehbar.

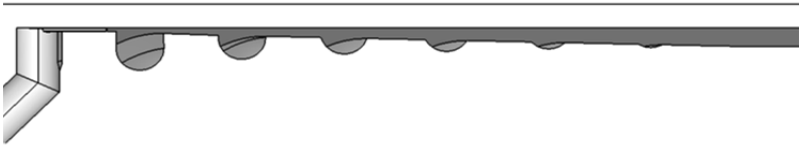


Abbildung 4.19: Wendeltiefenverlauf 3 - Spaltweitenverlauf 1

*Versuch 1* zeigt zudem für Variante ( $W_k1$ ,  $S_k3$ ) sowie Variante ( $W_k3$ ,  $S_k3$ ) einen starken Druckanstieg (Abbildung 4.20, Abbildung 4.21). Auch dieser lässt sich durch die engen Spalte innerhalb dieser linear-progressiven bzw. progressiv-progressiven Geometrievarianten gut nachvollziehen, so dass die Auswertung des Druckverlustes eine hohe Abbildegengenauigkeit zwischen Berechnungsergebnis und Realität aufzeigt.

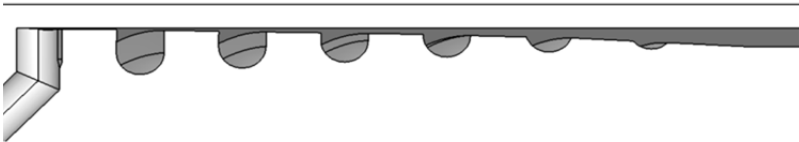


Abbildung 4.20: Wendeltiefenverlauf 1 - Spaltweitenverlauf 3

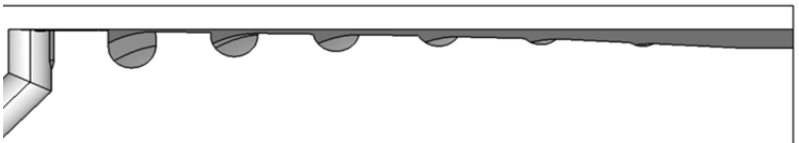


Abbildung 4.21: Wendeltiefenverlauf 3 - Spaltweitenverlauf 3

Die Gegenüberstellung der Überlappungswinkel ist Abbildung 4.22 zu entnehmen. Die Abszissenachse zeigt erneut die Geometrievarianten (Spaltweitenverlauf und Wendeltiefenverlauf). Die Ordinatenachse zeigt den sich einstellenden Überlappungswinkel für unterschiedliche Geometrievarianten.

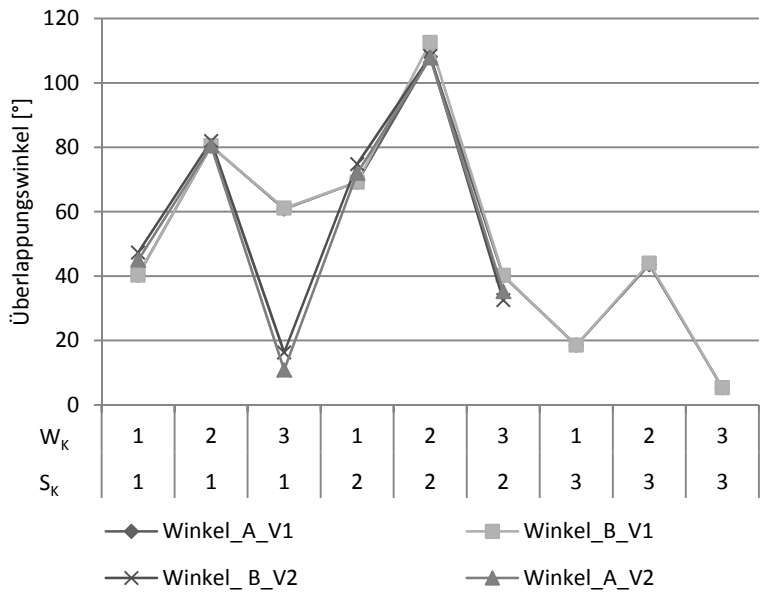


Abbildung 4.22: Versuch 1 & 2 – Überlappungswinkel

Die schnell abnehmende Wendelkanaltiefe bei dem progressiven Verlauf ( $W_K3, S_K1$ ) und ( $W_K3, S_K3$ ) ist auch hier eindeutig erkennbar. Der größte Überlappungswinkel stellt sich bei allen Versuchen bei Variante ( $W_K2, S_K2$ ) ein, bei der sowohl der Spaltweitenverlauf als auch der Wendeltiefenverlauf degressiv verläuft und somit tiefe Wendeln und ein vergleichsweise großer Spalt erzeugt werden.

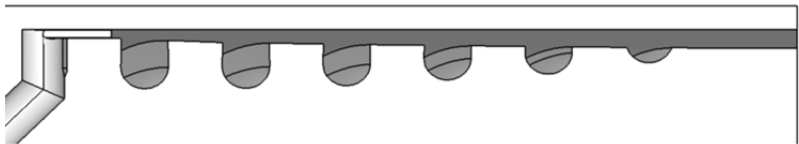


Abbildung 4.23: Wendeltiefenverlauf 2 - Spaltweitenverlauf 2

Die Gegenüberstellung der Überlappungswinkel für die verschiedenen Betriebspunkte aus *Versuch 3* ist Abbildung 4.24 zu entnehmen. Die Variation der Steigung der Viskositätsfunktion zeigt stark unterschiedliche Verläufe und wird somit als geeignetes Kriterium zur Überprüfung der Betriebspunktunabhängigkeit verifiziert.

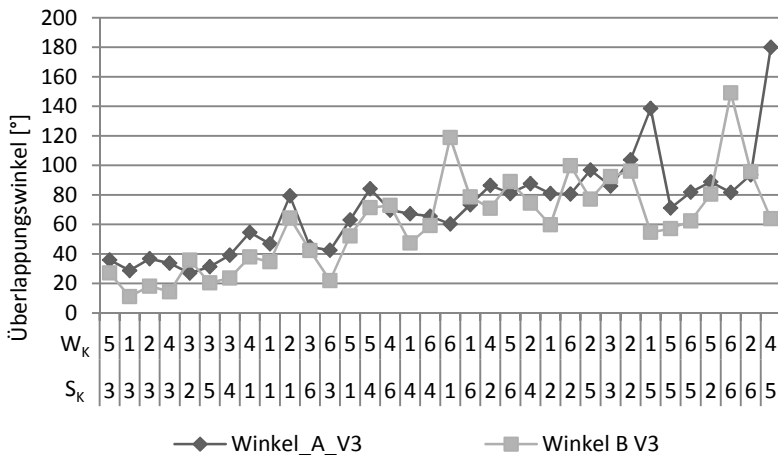


Abbildung 4.24: Auswertung Versuch 3 - Überlappungswinkel

Die Versuche bestätigen darüber hinaus, dass eine Variation der Nullviskosität lediglich eine Veränderung des Niveaus verschiedener Auswertegrößen, nicht jedoch der tendenziellen Verläufe erzeugt. Ähnlich verhält es sich in den isothermen Berechnungen für die Variation des Massestromes in *Versuch 2*. Zur Absicherung einer guten Betriebspunktunabhängigkeit des Extrusionswerkzeuges bietet sich damit, die bereits in [LSP09], [WiF86], [Wor78] vorgestellte Methode der Variation der Steigung der Viskositätskurve im strukturviskosen Bereich (siehe *Versuch 3*) an.

Anhand von *Versuch 3* werden der Verlauf sowie die korrekte Berechnung der Qualitätskennwerte verifiziert. Ein Abgleich zu Geometriekeenngrößen erfolgt an dieser Stelle nicht.

In Abbildung 4.25 werden die Verläufe der vier Qualitätskennwerte für den Druckverlust ( $Z_{dp}$ ), die Geschwindigkeitsverteilung ( $Z_{dv}$ ), den Überlappungswinkel ( $Z_{dW}$ ), der Betriebspunktunabhängigkeit ( $Z_{BP}$ ) sowie des Werkzeugqualitätskriteriums (DQC) gegenübergestellt. Die Abszissenachse zeigt insgesamt 36 Geometrievarianten, die primäre Ordinatenachse zeigt die dimensionslosen Kennwerte der Zielfunktionen.

Der einheitlich steigende Verlauf der Qualitätskennwerte des Überlappungswinkels sowie der Betriebspunktunabhängigkeit zeigt sehr gute Übereinstimmung mit dem Gesamt-Werkzeugqualitätskriterium (DQC). Der Verlauf des Druckverlustes ist gegenläufig, nimmt aber aufgrund der geringen Gewichtung nur geringen Einfluss auf die Gesamt-Werkzeugqualität. Die Geschwindigkeitsverteilung ist aufgrund des deutlich erhöhten Massedurchsatzes in diesem Versuch ungleichmäßig und schwankt um den *Pessimalkwert* 1. Die Tendenz der Kennwerte des Überlappungswinkels sowie der Betriebspunktunabhängigkeit korrelieren gut mit dem Verlauf des DQC. Insgesamt ist ersichtlich, dass einzelne Peaks eines Kennwertes (z.B. Druck bei Variante 3-6) nicht unbedingt einen maßgeblichen Einfluss auf das Gesamtergebn zeigen, wenn die Gewichtung dieses Kennwertes gering ausfällt.

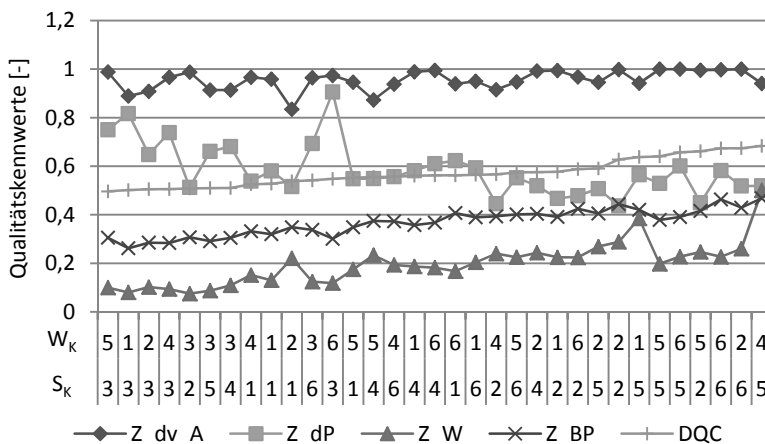


Abbildung 4.25: Gegenüberstellung verschiedener Zielfunktionen

Der korrekte **Einfluss der Werkzeuggeometrie** auf das Berechnungsergebnis wird anhand von vier speziellen Wertekombinationen der Designvariablen in *Versuch 4* bestätigt. Berechnet werden Geometrievarianten mit vergleichsweise großen sowie kleinen Fließwiderständen innerhalb des Extrusionswerkzeuges in jeder möglichen Kombination. Die Ergebnisse dieser vier Berechnungen sind in Tabelle 4.3 dargestellt.

<b>Versuch 4</b>						
<b>Variante</b>	<b>Wendeltiefe</b>		<b>Spaltweite</b>		<b><math>\Delta p</math></b>	<b><math>W</math></b>
<b>Nr.</b>	<b>Form</b>	<b>Faktor</b>	<b>Form</b>	<b>Faktor</b>	<b>[bar]</b>	<b>[°]</b>
1	3	1	3	1	540	76
2	3	1	6	10	138	37
3	6	10	3	1	184	345
4	6	10	6	10	126	343

Tabelle 4.3: Werkzeuggeometrie - Druckverlust, Überlappungswinkel

Kurvenform 3 (*Variante 1 & 2*) führt zu einer schnellen Abnahme der Wendeltiefe bzw. der Spaltweite auf einen Wert nahe dem Minimalwert. Der sprunghafte Verlauf der Kurvenform 6 (*Variante 3 & 4*) verbleibt bis kurz vor dem Ende des Sekundärverteilers bei einem hohen Wert und springt dann auf den Minimalwert.

Die Auswertung zeigt einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Wendeltiefenverlauf sowie dem Spaltweitenverlauf auf die hier beispielhaft herangezogenen Auswertegrößen (Überlappungswinkel und Druckverlust). Enge Spalte führen aufgrund der erhöhten Reibung im System zu einem deutlichen Anstieg des Druckverlustes. Der maximale Druckverlust wird erreicht, wenn die Spaltweiten innerhalb des Extrusionswerkzeuges minimal werden (*Variante Nr. 1*), der minimale Druckverlust stellt sich im umgekehrten Fall ein (*Variante Nr. 4*). Eine gute Verteilwirkung (großer Überlappungswinkel) wird auch hier erreicht, wenn der Tiefenverlauf der Wendeln nur langsam abnimmt (*Variante Nr. 2 und Nr. 3*). Die Schmelze verbleibt lange Zeit in den Wendelkanälen und strömt damit weit über den Umfang. In der Praxis zeigt diese Variante jedoch eine schlechte Materialwechselcharakteristik aufgrund von geringen Strömungsgeschwindigkeiten und niedrigen Wandschubspannungen im Bereich der Wendeln.

Die vom Automatismus berechneten Ergebnisse entsprechen den in eigenen Praxisversuchen ermittelten Ergebnissen sowie auch Literaturwerten (z.B. [Sei06], [Sei05]), so dass auf der Basis dieser Versuchsreihen eine gute Abbildegenauigkeit des Automatismus verifiziert werden kann.

Die Robustheit und korrekte Funktionsweise der Methodik kann auf der Basis der durchgeführten Berechnungen validiert werden. Ebenso zeigt die gewählte Formulierung der Qualitätskriterien einen mit Literatur- und Messwerten übereinstimmenden Verlauf, so dass die Abbildegenauigkeit der Qualitätskriterien verifiziert werden kann.

Zur Validierung des Automatismus wird ein **Optimierungslauf** durchgeführt. Die Freiheitsgrade des Optimierungslaufes umfassen verschiedene Kurvenformen und Kurvenfaktoren für den Spaltweitenverlauf sowie den Wendeltiefenverlauf. Als Optimierungsalgorithmus wird das Verfahren der Differential Evolution eingesetzt. Der Optimierungsalgorithmus erzeugt *29 Generationen* mit jeweils *20 Individuen* und konvergiert nach *561 Iterationen* (*1.122 CFD-Ergebnisauswertungen*, sich wiederholende Designvorschläge werden nicht erneut berechnet). Der Massestrom für die Simulation wird mit *250 kg/h* definiert und liegt damit im Nennauslegungsbereich des Versuchswerkzeuges. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Optimierung dargestellt und erläutert. Tabelle 4.4 zeigt eine Korrelationsanalyse des eingesetzten Optimierungssystems. Ergebnisse nahe den Werten *+1* oder *-1* (farblich hervorgehoben) zeigen eine hohe Korrelation, wohingegen Werte nahe dem Wert *0* eine Unabhängigkeit voneinander aufweisen.

Hohe Korrelationen zwischen den Qualitätskennwerten und den Freiheitsgraden sind bei den Parametern *Spalt\_Form*, *Wendel\_Faktor* und *Wendel\_Form* ersichtlich. Der Faktor der Spaltweite wirkt sich weniger stark auf das Berechnungsergebnis aus. Erklären lässt sich dieser Zusammenhang dadurch, dass das zur Verfügung stehende Intervall im Bereich des Überstromspaltes auf *8 mm* begrenzt ist, während das Intervall der Wendeltiefe auf Werte bis *21,6 mm* ansteigen kann. Der Gesamtverlauf der Wendeltiefe lässt sich somit in einem größeren Bereich variieren als die Spaltweite.

	s_Fa	s_Fo	w_Fa	w_Fo	DQC	Z_BP	Z_dv	Z_dTraut1	Z_dTraut2	Z_dp	Z_w
s_Fa	1,0000	-0,4978	-0,4757	-0,5480	0,5148	0,5518	0,3972	0,1787	0,2377	0,3271	0,6023
s_Fo	-0,4978	1,0000	0,4242	0,6102	-0,6035	-0,6495	-0,3695	-0,4757	-0,2265	-0,3062	-0,7008
w_Fa	-0,4757	0,4242	1,0000	0,5150	-0,6605	-0,5796	-0,6384	-0,4664	-0,3704	-0,5450	-0,6047
w_Fo	-0,5480	0,6102	0,5150	1,0000	-0,5696	-0,7027	-0,3443	-0,4211	-0,1300	-0,2697	-0,7132
DQC	0,5148	-0,6035	-0,6605	-0,5696	1,0000	0,8338	0,8250	0,6948	0,7224	0,7940	0,8366
Z_BP	0,5518	-0,6495	-0,5796	-0,7027	0,8338	1,0000	0,5293	0,5472	0,2953	0,4612	0,9549
Z_dv	0,3972	-0,3695	-0,6384	-0,3443	0,8250	0,5293	1,0000	0,6351	0,6418	0,8672	0,5425
Z_dTraut1	0,1787	-0,4757	-0,4664	-0,4211	0,6948	0,5472	0,6351	1,0000	0,3514	0,5439	0,5184
Z_dTraut2	0,2377	-0,2265	-0,3704	-0,1300	0,7224	0,2953	0,6418	0,3514	1,0000	0,7372	0,2939
Z_dp	0,3271	-0,3062	-0,5450	-0,2697	0,7940	0,4612	0,8672	0,5439	0,7372	1,0000	0,4630
Z_w	0,6023	-0,7008	-0,6047	-0,7132	0,8366	0,9549	0,5425	0,5184	0,2939	0,4630	1,0000

Tabelle 4.4: Korrelationsanalyse des Optimierers



Der Verlauf der Optimierung ist in Abbildung 4.26 dargestellt. Die vom Optimierungsalgorithmus gewählten Wertekombinationen (*Wendel\_Form*, *Wendel\_Faktor*, *Spalt\_Form*, *Spalt\_Faktor* – siehe Abbildung 4.11) sowie der Verlauf des DQC sind auf der Ordinatenachse über der Anzahl der Iterationen (Abszissenachse) aufgetragen. Zusätzlich werden für jede Iteration die Wertebereiche mit Hilfe eines schwarzen Balkens angezeigt, die innerhalb dieser Generation vom Algorithmus vorgeschlagen wurden.

Der tendenzielle Verlauf des Optimierungsalgorithmus ist gut ersichtlich. Zu Anfang der Berechnungsaufgabe sind die Intervalle für Variantenkonstruktionen sehr groß und nehmen mit zunehmender Optimierungszeit deutlich ab. Ebenso verhält es sich für den Wertebereich des DQC, welcher von anfänglich hohen Werten kontinuierlich seinem Minimalwert entgegenstrebt.

Als optimale Wertekombination ermittelt der Optimierungsalgorithmus für diese Versuchswerkzeuggeometrie eine Kombination eines konstanten, minimal faktorisierten Spaltweitenverlaufes ( $S_K = 6$ ,  $S_F = 1$ ) in Kombination mit einem ebenfalls konstanten, maximal faktorisierten Wendeltiefenverlauf ( $W_K = 6$ ,  $W_F = 10$ ). Der durch diese Vorgabe generierte Geometrievorschlagn ist in Abbildung 4.27 in einer Schnittansicht durch den Wendeltiefen- und Spaltweitenverlauf dargestellt. Die Auswahl dieser Extremwerte (Maximalfaktor und Minimalfaktor) legt die Vermutung nahe, dass eine Erweiterung der Freiheitsgrade in Folgeversuchen sinnvoll sein kann.

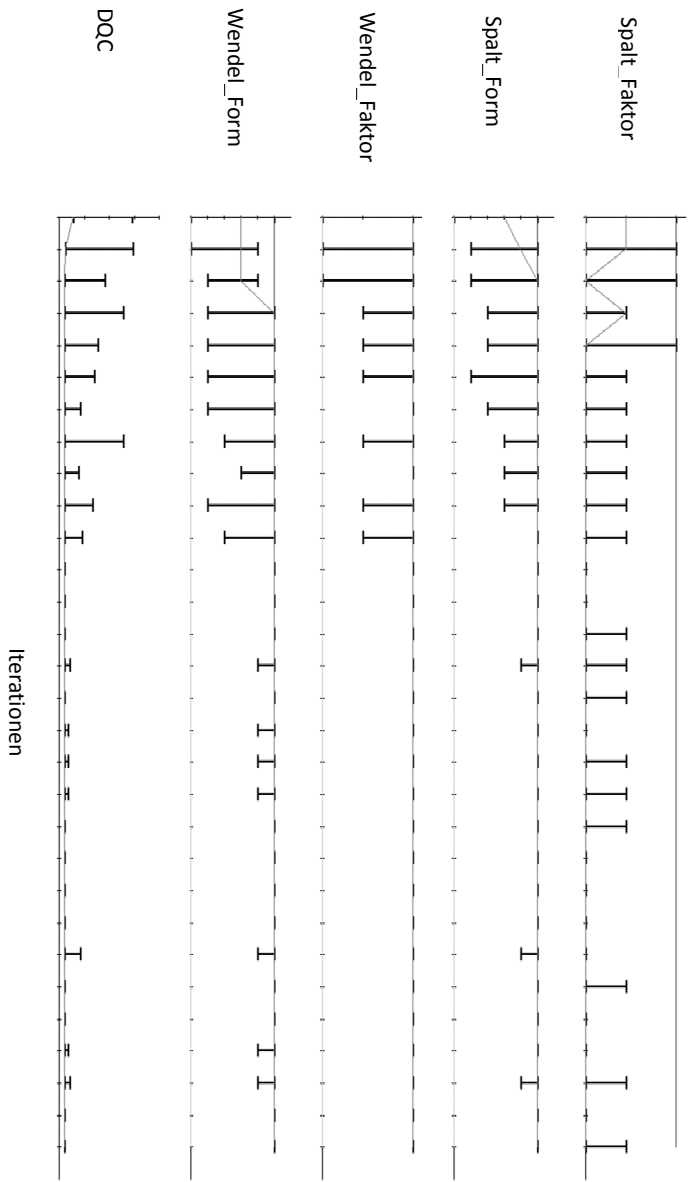


Abbildung 4.26: Verlauf der Optimierung

Die vom Optimierungssystem als optimal ermittelte Geometrievariante zeigt Abbildung 4.27. Die Wendeltiefen verbleiben bis kurz vor dem Düsenbereich auf einem hohen Wert, der Spaltweitenverlauf ist über die gesamte Länge sehr eng.

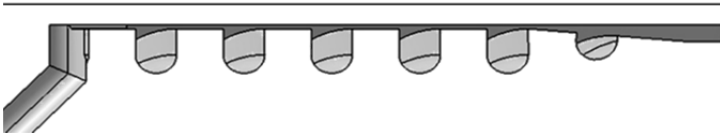


Abbildung 4.27: Optimierungsergebnis

Der Volumenstrom der Schmelze ist dadurch in den Wendeln hoch, so dass diese weit über den Umfang des Systems strömen kann und mit dem geringen Anteil überströmender Schmelze einen großen Überlappungswinkel ausbildet. Die CFD-Auswertung des Überlappungswinkels zeigt Abbildung 4.28. Die Pfadlinien zweier Wendeln sind in unterschiedlichen Farben eingefärbt dargestellt. Der Überlappungswinkel der Schmelze ist groß.

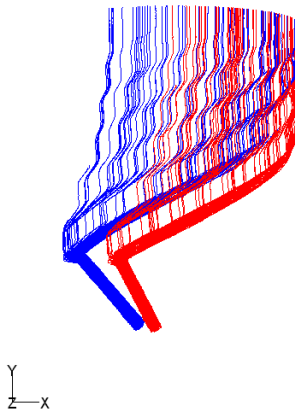


Abbildung 4.28: Überlappungswinkel CFD-Simulation

Die durch die tiefen Wendeln entstehenden geringen Strömungswiderstände führen zu geringen Wandschubspannungen wobei die kritischen Grenzwerte nicht unterschritten werden. In Abbildung 4.29 ist die CFD-Auswertung der Wandschubspannungen dargestellt. Die Maximalwerte liegen im engen Spaltbereich nahe dem Wendelauslauf. Die Minima sind in der strömungstechnisch nicht optimal gestalteten Zone der Speisebohrungen zu finden. Die Wandschubspannungen liegen insgesamt innerhalb des tolerierten Intervalls.

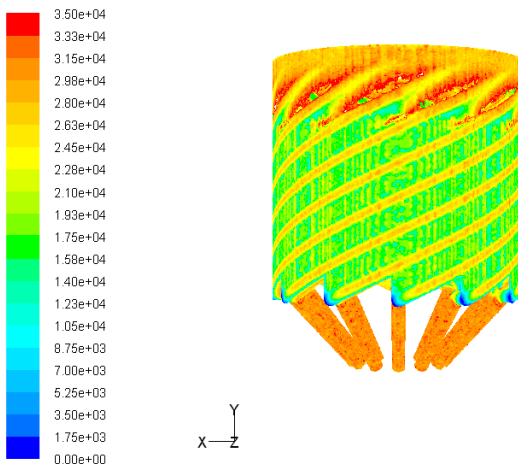


Abbildung 4.29: Wandschubspannungen CFD-Auswertung

Die durch die vergleichsweise geringen Wandschubspannungen hervorgerufene geringe Reibung im System führt zu einem moderaten Druckverlust. Der Konturplot des Druckes aus der CFD-Auswertung ist in Abbildung 4.30 dargestellt. Im Bereich des Extruderanschlusses wird der Maximaldruck errechnet.

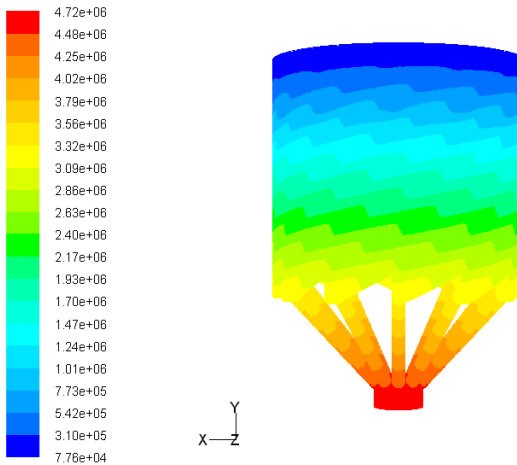


Abbildung 4.30: Druckverlust - CFD-Auswertung

Der Qualitätskennwert der Geschwindigkeitsverteilung dieses Geometrievorschlags kann von wenigen anderen Varianten unterschritten werden, dabei nimmt jedoch der Überlappungswinkel ab, welcher aufgrund seiner hohen Gewichtung das Gesamtergebnis beeinträchtigt, so dass die gewichtete Summenmethode für diesen Designvorschlag einen Optimalwert berechnet.

Die Zielsetzung dieser Arbeit war der Aufbau sowie die Überprüfung einer Methodik zur vollständig automatisierten Durchführung einer Extrusionswerkzeugauslegung sowie die Kopplung dieses automatisierten Prozesses mit einem Optimierungsalgorithmus. Die robuste Funktionsweise der automatisierten Optimierung kann sichergestellt, die Übereinstimmung des Optimierungsergebnisses mit der Realität kann verifiziert werden. Das Ziel der Arbeit gilt damit als erreicht.

Zur Weiterentwicklung des Automatismus wird im Folgenden eine kritische Betrachtung der durchgeführten Optimierung sowie der Auswertung vorgenommen und mögliche Erweiterungspotentiale aufgezeigt.

#### 4.11 Ergebnisdiskussion und Erweiterungspotential

Die Versuchsauswertung zeigt deutlich, dass die Abbildegenauigkeit der erstellten Routine hoch ist und dass mit der gewählten Formulierung und Gewichtung der Zielfunktionen die automatisierte Optimierung von Wendelverteilerwerkzeuggeometrien möglich ist. Dennoch können auf der Basis der Versuchsergebnisse auch Schwachstellen des Automatismus erkannt werden, die weiteren Untersuchungen bedürfen. Eine dieser Schwachstellen ist die konstante Gewichtung der Zielgrößen über unterschiedliche Wertebereiche und damit die bevorzugte Optimierung von Teilzielen - auch weit über die Erfüllung der Mindestanforderungen hinaus.

In der Praxis werden bei der Auslegung eines Wendelverteilerwerkzeuges bestimmte Mindestkriterien aufgestellt, welche erreicht werden müssen. Ein anschauliches Beispiel eines solchen Mindestkriteriums ist die Vorgabe eines minimalen Überlappungswinkels oder eines maximalen Druckverlustes. Der Konstrukteur des Extrusionswerkzeuges versucht diese Kriterien zu erfüllen und kennt aus seiner Erfahrung heraus die Geometriegrößen, die zu einer Verbesserung eines Kennwertes führen. Ist ein erstes Kriterium erfüllt, versucht der Konstrukteur weitere Mindestanforderungen zu erfüllen, ohne dabei die bereits erfüllten Kriterien zu verletzen.

Analog dazu arbeitet der vorgestellte Optimierungsalgorithmus, jedoch mit der Unterscheidung, dass der Algorithmus sich die Korrelationen zwischen Geometrievariation und Berechnungsergebnis zunächst durch „Ausprobieren“ herleiten muss (siehe Tabelle 4.4). Dabei verfügt der Algorithmus in der bisher gezeigten Version jedoch nicht über die Intelligenz zu erkennen, wann ein Kriterium zufriedenstellend erreicht ist. Stattdessen strebt der Algorithmus unablässig danach, die in der Summenfunktion am höchsten gewichteten Kennwerte weiter zu erhöhen, auch wenn die Erfüllung anderer Kriterien ab einem gewissen Status bereits von größerer Notwendigkeit wäre. Am Beispiel des Überlappungswinkels bedeutet dies, dass der Optimierer auch nach der Erreichung eines guten Wertes, kontinuierlich eine weitere Steigerung erzeugt, auch wenn andere (geringer gewichtete) Kriterien dadurch verschlechtert werden.

Ebenso bedeutet dies, dass es dem Optimierer durchaus passieren könnte, Designvorschläge zu präferieren, die in Einzelkriterien kritische Grenzwerte verletzen, solange die Gewichtung anderer Kennwerte in Summe wieder zu einem guten Ergebnis führt.

Zur Vermeidung dieser Problematik wird im Folgenden ein Ansatz vorgestellt und untersucht, der bislang nicht in den Automatismus implementiert worden ist, in Einzelversuchen aber bereits gute Ergebnisse aufgezeigt hat.

Alternativ zu der mathematischen Beschreibung der Qualitätsfunktionen über einen linearen Verlauf, wird ein einheitlicher trigonometrischer Verlauf auf der Basis des Arcustangens herangezogen. Die Parametrierung der Funktion erfolgt für jedes Qualitätskriterium unterschiedlich, auf die jeweiligen Mindestanforderungen angepasst. Der Kurvenverlauf des Arcustangens liegt zwischen zwei Grenzwerten und zeigt einen Wendepunkt auf. Die Formulierung der Zielfunktionen mit Hilfe dieser trigonometrischen Funktionen ersetzt damit die Vorgehensweise der Beschreibung der Zielgrößen durch lineare Verläufe bzw. Föpl-Klammern.

Die einheitlich formulierte Qualitätsfunktion lautet:

$$Z_x(x) = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{K - x \cdot W}{I}\right) + Y}{N}$$

Formel 4.14: Trigonometrische Formulierung der Qualitätskennwerte

mit

$K$  = Lage der Kurve

$W$  = Lage des Wendepunktes

$I$  = Intensität der Krümmung

$Y$  =  $Y$  – Achsenkorrektur

$N$  = Normierungswert

Drei mögliche Verläufe der Funktion  $Z_x$  sind in Abbildung 4.32 für die Parametrierung gemäß Tabelle 4.5 dargestellt. Die Abszissenachse zeigt den Wertebereich einer unabhängigen Variablen.

Auf der Ordinatenachse ist der Kennwert des Zielkriteriums dargestellt. Die Charakteristik jeder Kurve ist identisch. Jede Kurve besitzt einen Wendepunkt und nähert sich asymptotisch einem Maximal- sowie einem Minimalwert an.

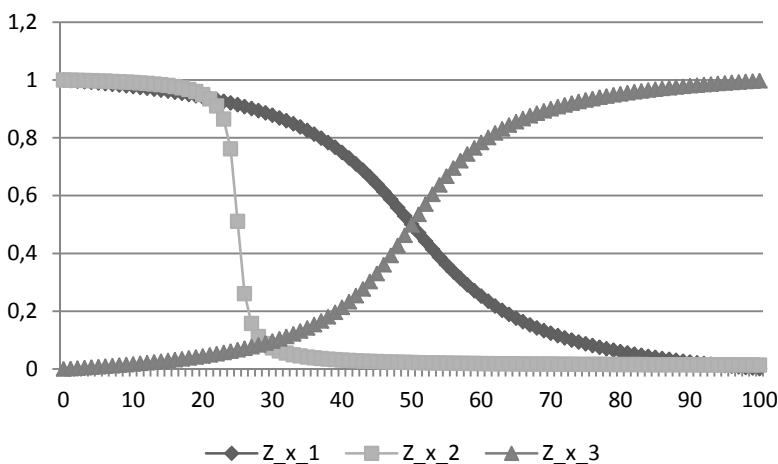


Abbildung 4.31: Kurvenverläufe trigonometrische Formulierung

	a	b	c	d	e
<b>Z_x_1</b>	500	10	130	1,32	2,636428
<b>Z_x_2</b>	250	20	250	1,5	2,285398
<b>Z_x_3</b>	2500	50	500	1,38	2,753401

Tabelle 4.5: Parametrierung verschiedener Verläufe

Für unterschiedliche Zielgrößen kann somit eine einheitliche Formulierung herangezogen werden, die jeweils für den Anwendungsfall parametrisiert wird. Für die Zielfunktion des Überlappungswinkels eignet sich der Verlauf der Funktion Z\_x\_2. Unterhalb eines Grenzwertes nimmt der Verlauf einen schlechten Wert an und schlägt nach der Erreichung des minimal geforderten Überlappungswinkels in einen guten Wertebereich um. Anders verhält es sich für den Druckverlust, der durch Kurvenform Z\_x\_1 charakterisiert werden kann und damit bei der Überschreitung kritischer Werte stark zunimmt.



Zur Überprüfung der Eignung wird die Auswertung eines Versuches mit der gezeigten trigonometrischen Funktion durchgeführt und mit dem Berechnungsergebnis der linearen Formulierung verglichen. Die Parametrierung der dabei eingesetzten Zielfunktionen erfolgt dabei wie in Tabelle 4.6 dargestellt.

	a	b	c	d	e
<b>Z_T_1</b>	1500	10	30	1,667	3,218
<b>Z_T_2</b>	15000	1/100	200	1,6	3,158
<b>Z_dv</b>	450	55	200	1,5	2,8
<b>Z_W</b>	300	10	130	1,6	2,778
<b>Z_dp</b>	500	1	70	1,45	2,882

Tabelle 4.6: Parametrierung der trigonom. Zielfunktionen

Ein beispielhafter Verlauf ist in Abbildung 4.32 für den Überlappungswinkel gezeigt. Die Auswertung gilt für *Versuch 3*. Auf der Abszisse sind 34 unterschiedliche Geometrievarianten dargestellt. Die linke Ordinatenachse zeigt den Kennwert der Qualitätskriterien (*Winkel\_lin.*, *Winkel\_trig.*), die rechte Ordinatenachse zeigt den absoluten Wert der Überlappungswinkel.

Die trigonometrische Formulierung des Auswertekriteriums (*Z\_W Trig.*) weist im Bereich sehr kleiner Überlappungswinkel eine große Steigung sowie einen hohen skalaren Wert auf und nimmt nach der Überschreitung eines Minimalwertes eine flache Steigung bei niedrigen absoluten Werten an. Die lineare Formulierung ist direkt proportional zum Verlauf des Überlappungswinkels.

Eine Folge der trigonometrischen Formulierung ist, dass bei einer konstanten Gewichtung innerhalb der gewichteten Summenmethode, der Qualitätskennwert des Überlappungswinkels bei einer Unterschreitung des Sollwinkels hervorgehoben wird, jedoch an Einfluss verliert wenn der Sollwinkel bereits erreicht ist.

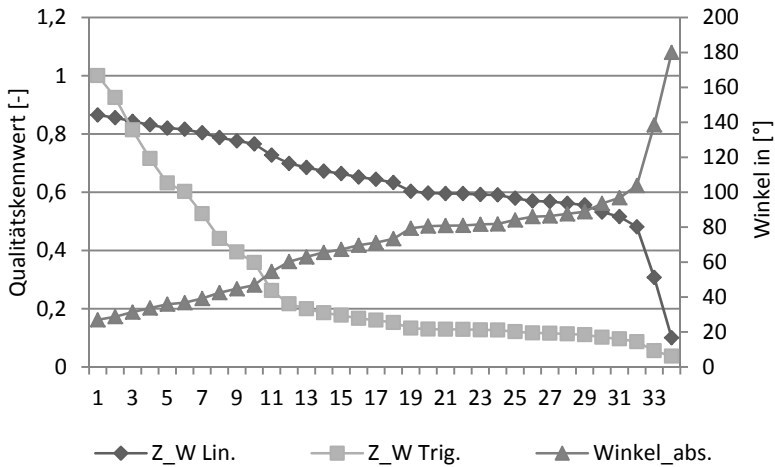


Abbildung 4.32: Lineare und trigonometrische Winkelauswertung

Ein weiteres Auswertergebnis ist in Abbildung 4.33 dargestellt. Die Abszissenachse zeigt 34 verschiedene Geometrievarianten. Die linke Ordinatenachse zeigt den Qualitätskennwert, die rechte Ordinatenachse zeigt den Absolutwert des Druckverlustes.

Der lineare Verlauf ist direkt proportional zum Druckverlust. Die trigonometrische Formulierung des Druckverlustkennwertes zeigt im Bereich kleiner Druckverluste eine ähnliche Tendenz wie die lineare Formulierung, nimmt jedoch mit zunehmendem Druckverlust eine deutlich erhöhte Steigung ein, so dass hohe skalare Qualitätskennwerte erreicht werden. Zudem ist es oft nicht leicht den Normierungswert für den Druckverlust im Vorfeld zu definieren. Liegt dieser zu hoch, wird der Druck besser bewertet, liegt dieser zu niedrig kann eine Überschreitung dieses Wertes erfolgen, so dass das Qualitätskriterium einen Wert  $> 1$  annimmt.

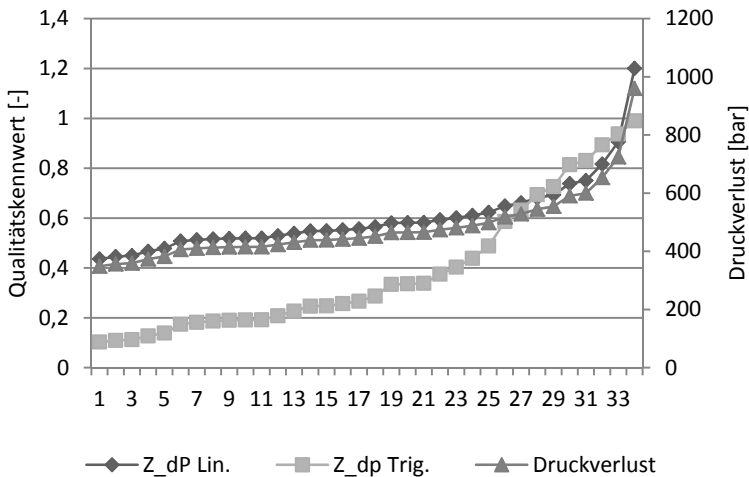


Abbildung 4.33: Lineare und trig. Druckverlustauswertung

Zur Veranschaulichung des Einflusses der trigonometrischen Formulierung der Auswertefunktionen auf das Gesamtergebnis werden zwei vereinfachte gewichtete Summenfunktionen gebildet, die wie folgt formuliert werden:

$$f_{Lin.}(x) = 0,5 \cdot Z_{dp,Lin.} + 0,5 \cdot Z_{W,Lin.}$$

$$f_{Trig.}(x) = 0,5 \cdot Z_{dp,Trig.} + 0,5 \cdot Z_{W,Trig.}$$

Formel 4.15: Vereinfachte Summenformulierung Lin. vs. Trig.

Den Verlauf dieser Funktionen zeigt Abbildung 4.34. Die Abszissenachse zeigt 34 verschiedene Geometrievarianten. Die Ordinatenachse zeigt den Qualitätskennwert der Funktion. Insgesamt fällt auf, dass der Kurvenverlauf der trigonometrischen Formulierung der Zielfunktion einen stärkeren Anstieg aufweist als der Verlauf der linearen.

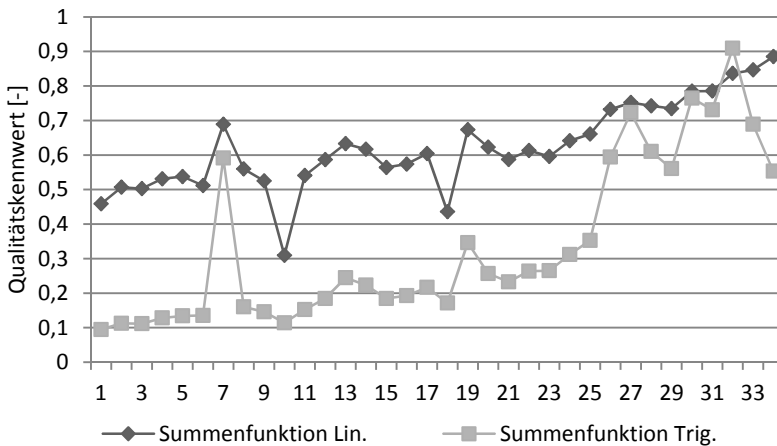


Abbildung 4.34: Summenfunktion trig. und lin. Verläufe

Weiter sind die stark schwankenden Ergebnisse an den Position 7, 10, 18 und 19 von Interesse. Die absoluten Winkel an den oben genannten Positionen betragen  $26,9^\circ$  (Pos. 7);  $179,9^\circ$  (Pos. 10);  $138,5^\circ$  (Pos. 18) und  $46,8^\circ$  (Pos. 19). Der mittlere Winkel über alle Versuche beträgt  $71,2^\circ$ .

Es ist gut zu erkennen, dass negative Abweichungen bis unter den Mindestwinkel (hier definiert zu  $30^\circ$ ) einen erheblichen Einfluss auf die trigonometrische Formulierung, jedoch nur einen vergleichsweise geringfügigen Einfluss auf die lineare Formulierung aufweisen. Zudem zeigen erhebliche Anstiege des Überlappungswinkels (wie an Pos. 10, 18) deutlich weniger ausgeprägte Zielwertveränderungen bei der trigonometrischen Formulierung, was den realen Anforderungen an ein Extrusionswerkzeug sehr genau entspricht.

Es kann verallgemeinert und zusammengefasst werden, dass die trigonometrische Formulierung der Qualitätskennwerte gegenüber der linearen Formulierung Vorteile aufweist. Insbesondere bei Auswertegrößen bei denen das Qualitätskriterium solange von untergeordneter Bedeutung ist, bis ein kritischer Grenzwert berührt wird zeigt die trigonometrische Formulierung Stärken. Weitere Erweiterungsmöglichkeiten werden im Ausblick aufgegriffen.

## 5. Zusammenfassung und Fazit

Die Auslegung von Extrusionswerkzeugen ist ein zeitintensiver Prozess der ein hohes Maß an Erfahrungswissen erfordert. Der Einsatz von CFD-Systemen zur Simulation der Strömung einer Kunststoffschmelze innerhalb eines Extrusionswerkzeuges findet zunehmend Anwendung in Forschung und Industrie und stellt eine wichtige Erweiterung der Möglichkeiten bei der Extrusionswerkzeugauslegung dar.

Ziel dieser Arbeit ist die integrative Kopplung verschiedener Softwaresysteme zur vollständig automatisierten Auslegung eines Wendelverteiler-Extrusionswerkzeuges auf der Basis eines parametrischen, assoziativen 3D-CAD-Modells. Zur Auswertung der verschiedenen Designvorschläge wird das Ziel formuliert, ein automatisiert kalkulierbares, skalares Zielkriterium (DQC) zur Beschreibung der Werkzeugqualität einzuführen.

In einer manuellen computergestützten Optimierung eines prototypischen Radialverteilerwerkzeuges für die Blasfolienextrusion werden zunächst Auswertemethoden erarbeitet, die eine spätere automatisierte Auslegung auf der Basis skalarer Kennwerte erlauben.

Diese Auswertegrößen beschreiben als skalaren Kennwert produktqualitätsrelevante Parameter wie die Wanddickenverteilung des Extrudates, den Winkel der Schmelzeüberlappung sowie den Druckverlust, die Betriebspunktabhängigkeit und die Spülbarkeit des Werkzeuges. Darüber hinaus wird ein Indikator für das Auftreten von Schmelzebruchphänomenen eingeführt.

Die Abbildegenauigkeit der formulierten Qualitätskennwerte wird anhand eines manuell ausgelegten, prototypischen Radialverteilerwerkzeuges in realen Praxisversuchen verifiziert. Die Abbildegenauigkeit ist hoch, der Fehler liegt im vernachlässigbaren Bereich.

Im zweiten Schwerpunkt der Arbeit wird ein Ablauf implementiert, der die zuvor manuell durchgeführten Schritte automatisiert bearbeitet. Dazu werden verschiedene Softwaresysteme integrativ gekoppelt. Ein übergeordnetes Softwaresystem steuert auf der Basis implementierter ProgrammROUTINEN die verschiedenen Prozessschritte der Geometrievariation, Ableitung und

Diskretisierung des Fluidvolumens, Preprocessing, Solving, Postprocessing, Ergebnisinterpretation und der Berechnung eines Werkzeugqualitätskriteriums. Neue Geometrievorschlge werden durch ein heuristisches Optimierungsverfahren vorgeschlagen, so dass der Prozess iterativ bis zur Erreichung eines Abbruchkriteriums vollständig automatisiert abläuft.

Als zu optimierendes Wendelverteilerwerkzeug wird eine real existierende Werkzeuggeometrie eingesetzt. Die Basiskonfiguration des Wendelverteilers wird vorgegeben. Der Spaltweitenverlauf sowie der Wendeltiefenverlauf werden dem Optimierungssystem als Freiheitsgrade zur Verfügung gestellt. Der Optimierungsautomatismus errechnet voll automatisiert und ohne Benutzereingriff einen optimalen Geometrievorschlag für den Spaltweiten- und Wendeltiefenverlauf und gibt diesen als Optimierungsergebnis aus.

Der Automatismus löst die gestellte Optimierungsaufgabe robust und ohne Unterbrechungen. Der vorgeschlagene Optimal-Verlauf entspricht manuellen Auslegungen dieser Art von Verteilsystemen, so dass eine hohe Abbildegenauigkeit des Automatismus verifiziert werden kann.

Das zuvor definierte Ziel der Arbeit gilt damit als erreicht.

Im Weiteren werden Ergänzungs- und Verbesserungsmöglichkeiten des implementierten Automatismus vorgeschlagen und in Berechnungsversuchen untersucht. Als Erweiterungsmöglichkeit wird eine Überarbeitung der Formulierung der Qualitätskriterien vorgeschlagen, die einen trigonometrischen Funktionsverlauf mit einer Wendestelle auf der Basis des Arcustangens vorsieht. Der Vorteil dieser Methode liegt in der Nicht-linearität der Qualitätskriterien, so dass kritische Grenzwerte definiert werden können, deren Verletzung zu einer starken Beeinflussung des Optimierungskriteriums führt. Darüber hinaus kann erreicht werden, dass nach dem Erreichen eines Zielwertes eines speziellen Qualitätskriteriums keine kontinuierliche weitere Verbesserung dieses Wertes im Vordergrund steht.

## 5.1 Ausblick

Nachdem die grundlegende Struktur der automatisierten und CAD-Modellbasierten Wendelverteileroptimierung in der vorliegenden Arbeit erzeugt, die Methodik validiert und die Abbildegenauigkeit verifiziert wurde, werden in diesem Ausblick Erweiterungsmöglichkeiten des Systems aufgezeigt.

Das 3D-CAD-Modell stellt die Ausgangsbasis jedes Berechnungsschrittes dar und definiert die Freiheitsgrade des Gesamtsystems. Die Erweiterung des CAD-Modells um zusätzliche Freiheitsgrade sowie um Variantenkonstruktionen (z.B. alternative Primärverteilungen) ist ein wichtiger Schritt, um praxisnahe Optimierungen mit dem Automatismus durchführen zu können. Darüber hinaus stellt die Wissensintegration über fertigungstechnische Restriktionen eine interessante Herausforderung dar, so dass z.B. wirtschaftlich unmöglich zu fertigende Geometrievarianten bereits im CAD-System als solche identifiziert und dementsprechend umgangen werden. Eine hohe Robustheit des Modellaufbaus sowie der Vernetzung im CAD-internen Vernetzungssystem ist obligatorisch für einen stabilen Durchlauf der Methodik und stellen damit eine Basisanforderung an das CAD-Modell dar.

In Bezug auf die CFD-Simulation steht zunächst die Erweiterung um die Berechnung nicht-isothermer Phänomene im Vordergrund. Diese erlaubt die Berücksichtigung von lokaler, scherinduzierter Erwärmung der Schmelze und bietet darüber hinaus die Möglichkeit der Erweiterung des Systems um eine Optimierung hinsichtlich einer optimalen Werkzeug-Temperaturführung. Die Einbeziehung von viskoelastischen Material-Effekten kann weiter dazu beitragen, die Abbildegenauigkeit zu steigern, erhöht jedoch auch die Komplexität. Die Simulation von Mehrphasen-Strömungen (Coextrusion) stellt ebenfalls großes Erweiterungspotential dar.

Die automatisierte Auswertung der Werkzeugqualität auf Basis eines skalaren Kennwertes kann um weitere Qualitätsfunktionen ergänzt werden. Von besonderem Interesse sind dabei die Berücksichtigung von Schmelze-Verweilzeiten innerhalb des Extrusionswerkzeuges sowie die automatisierte Auswertung von Leckstromkurven. Die Implementierung der bereits in dieser Arbeit vorgestellten Formulierung der Zielgrößen durch trigonometrische Funktionen stellt ebenfalls eine interessante Erweiterung des Systems dar.

Jede Erweiterung des Systems führt zu einer Verlängerung der Rechenzeit. Der Gesamtaufwand einer Optimierung ist aufgrund der iterativen Vorgehensweise, insbesondere wenn rechenzeitintensive CFD-Berechnungen integriert sind, stets ein großer Nachteil der computergestützten Optimierung. Besonderes Augenmerk liegt damit auf der Beschleunigung des Prozesses. Durch eine Parallelisierung der zwei durchzuführenden CFD-Berechnungen (Betriebspunkt A und B), aber auch durch eine Parallelisierung innerhalb einer Optimierungs-Generation kann der Gesamtzeitbedarf stark verkürzt werden, allerdings sind dazu Investitionen in Softwarelizenzen sowie in Hardware notwendig. Als sinnvolle Erweiterung gilt darüber hinaus die Ausnutzung von Symmetrien innerhalb der zu berechnenden Geometrie.

Zur Reduktion der Investitionskosten und damit zur Ermöglichung der industriellen Nutzung der vorgestellten Methode ist die Übertragung des Gesamtprozesses auf Open-Source-Softwarelösungen interessant. Open-Source-Systeme sind in der Regel für den Endanwender kostenfrei und bieten umfangreiche Eingriffsmöglichkeiten in den Quellcode der Softwaresysteme. Die Substitution der hier eingesetzten kommerziell erhältlichen Systeme kann erhebliche Investitionskosten einsparen und damit dazu beitragen, die vorgestellte Methode in praktische Anwendungen zu überführen.

Weiteres Verbesserungspotential liegt in der benutzerfreundlichen Gestaltung der Bedienoberfläche und dem Aufbau einer leicht verständlichen, intuitiv zu bedienenden grafischen Benutzeroberfläche (GUI). Anhand von Eingabemasken soll der Benutzer durch die verschiedenen Schritte der Modellierung der Ausgangsgeometrie geleitet werden. Dabei können Hilfestellungen, basierend auf einem Wissenskatalog, bereitgestellt werden. Die Auswertung der Berechnungsergebnisse kann durch eine Erweiterung der Auswertung um eine automatisierte Protokollerstellung erleichtert werden. Das Protokoll beinhaltet eine Zusammenfassung der wesentlichen Eingabegrößen sowie die Berechnungsergebnisse jedes Designvorschlages und fasst diese in anschaulichen Diagrammen und Schaubildern zusammen.



## 5.2 Summary

The design of extrusion dies is a time consuming process with a huge necessity for practical knowledge. The use of CFD-Systems to simulate the flow behavior of polymer melts within an extrusion die is more and more introduced in research and industrial applications and has developed to an important area of application in the design of such systems.

The goal of this research work is the integrative coupling of different software systems for fully automatized design of a spiral mandrel die on the basis of a parameterized, associative 3D-CAD-model. To interpret the quality of the different design proposals the objective is formulated, to introduce an automatically calculable, scalar target criterion for the die quality (Die Quality Criterion - DQC).

In a manual computer aided optimization of a prototype flat spiral die for the blown film extrusion, different scalar quality criteria are analyzed to prepare the automatization.

These criteria describe quality-relevant parameters such as the wall-thickness distribution of the extrudate, the angle of the weld-line overlapping as well as the pressure loss, the operation-state dependency or the purge behavior of the system. Additionally an indicator for the occurrence of melt fracture is introduced.

The projection exactness of the different quality-criteria is verified in several practical tests by using a manual optimized prototype flat spiral die in a blown film extrusion line. The conformity of theoretically calculated values with real measurements is very high.

In a second focus of this research work a process is implemented to perform the design of an extrusion die completely automatized. Therefore different software-systems are coupled integratively. A superior master system steers different partial functions (geometry-variation, flow-volume-extraction, discretization, preprocessing, solving, postprocessing, and interpretation) on the basis of implemented program routines and calculates a die quality criterion. New design proposals are suggested by a heuristic optimization algorithm, so that this process

is running in an iteration loop until the optimum is found or termination criteria are reached.

For the validation of the optimization-procedure, existing spiral mandrel die geometry is used. The basis configuration of this die is predefined. The gap width and the spiral depth are used as degrees of freedom for the optimization system. The automated procedure calculates an optimal design proposal independent on user interactions.

This optimization task is solved robustly and without interruptions. The design proposal corresponds very well with manual design studies of such distributor systems so that the correctness of the solution can be verified.

The predefined goal of this research work is reached.

Further extension- and improvement-possibilities of the implemented automatization procedure are discussed and analyzed in different optimization-runs. To improve the procedure a new formulation of the quality criteria is discussed based on a trigonometric instead of linear formulation.

## 6. Literaturverzeichnis

- [Alt02] Alt, W.: *Nichtlineare Optimierung – Eine Einführung in Theorie, Verfahren und Anwendungen*, 1. Auflage, Fried. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig Wiesbaden, 2002, ISBN 3-5288-0319-X
- [Ber11] Bertram, T.: *Nichtlineare Optimierung – Datenbasierte Modellierung und Optimierung*, Vorlesungsskript, Technische Universität Dortmund, 2011, URL: [www.rst.e-technik.tu-dortmund.de/CMS/Medienpool/Downloads/Lehre/Vorlesungen/Regelungssysteme\\_II/Optimierung.pdf](http://www.rst.e-technik.tu-dortmund.de/CMS/Medienpool/Downloads/Lehre/Vorlesungen/Regelungssysteme_II/Optimierung.pdf)
- [Bet01] Betten, J.: *Kontinuumsmechanik – Elastisches und Inelastisches Verhalten Isotroper und Anisotroper Stoffe*, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001, ISBN 3-540-542043-6
- [BFW10] Burmann, G., Fischer, P., Wortberg, J.: *Schmelzefluss im Circularverteiler*, Kunststoffe, Carl Hanser Verlag München, Nr. 9, 2010, S. 150-155
- [Bla07] Blazek, J.: *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*, 2. Auflage, Elsevier Ltd., 2007, ISBN: 978-0-08-044506-9
- [Bli05] Blien, Ralf: *CAD-Glossar – Virtuelle Produktentwicklung*, Onlinedatenbank, [www.blien.eu](http://www.blien.eu), Erstellungsdatum: 23.05.2005, Tag des Zugriffs: 01.05.2011
- [Böc04] Böckh, P. v.: *Fluidmechanik – Einführendes Lehrbuch*, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004, ISBN 3-540-22076-3
- [Bur04] Burmann, G., Wortberg, J.: *Grundlagen und Strategien für die Auslegung von Extrusionswerkzeugen*, Seminar am Institut für Kunststoffverarbeitung IKV, Aachen, 2004

- [Bur06] Burmann, G.: „*Extrusionswerkzeuge für die Schlauchextrusion – Neue Prinzipien und Konzepte zur Auslegung von Wendelverteilerwerkzeugen*“, ETA Kunststofftechnologie GmbH, Troisdorf, 03.02.2006
- [Bur10] Burmann, G., Saul K.: „*Werkzeugtechnik in der Extrusion – Auswahl, Auslegung und Optimierung von Schmelzeverteilsystemen*“, Hanser Verlag, 6. Duisburger Extrusionstagung 2010
- [Can06] Cantor, K.: *Blown Film Extrusion – An Introduction*, Hanser Verlag München Wien, 2006, ISBN 978-1569-9039-64
- [Chu00] Chung, C.: *Extrusion of Polymers – Theory and Practice*, Hanser Verlag München Wien, 2000, ISBN 978-1569-9028-82
- [CNP03] Carneiro, O., S., Nobrega, J., M., Pinho, F., T., Oliveira, P. J.: *Automatic Design of Profile Extrusion Dies: Experimental Assessment*, Polymer Processing Society, PPS 2003
- [CNP04] Carneiro, O., S., Nobrega, J., M., Pinho, F., T., Oliveira, P. J.: *Automatic Balancing of Profile Extrusion Dies: Experimental Assessment*, Society of Plastics Engineers, SPE, Antec 2004, S. 91-95
- [Cre08] Cretu, Ionel Michael: *Analyse, Auslegung und Optimierung von Wendelverteilsystemen*, Dissertation an der Universität Stuttgart, 2008, ISBN 978-3-8322-775-5
- [DoD05] Domschke, W., Drexl, A.: *Einführung in Operations Research*, 6. Auflage, Springer Berlin Heidelberg New York, 2005, ISBN 3-540-23431-4
- [EPN10] Elgeti, S., Probst, M., Nicolai, M., Behr, M., Windeck, C., Michaeli, W.: *Simulation and Optimization of Modular Dies for Plastic Extrusion*, Colloquium on Modelling, Simulation and Optimization, RWTH Aachen, CATS (19.03.2010), 2010

- [Fan99] Fang, S.: *Konzipierung und Dimensionierung komplexer Extrusionswerkzeuge mittels der Methode der Finiten Elemente*, Dissertation, Universität Stuttgart, Shaker Verlag Aachen, 1999, ISBN-13 978-3826561795
- [FeP02] Ferziger, J. H., Peric, M.: *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2002, ISBN 978-3-540-68228-8
- [FiM06] Fischer, P., Michels, R.: *Moderne Schlauchköpfe mit Wendelverteilern*, Fachtagung Blasformtechnik 2006, Süddeutsches Kunststoff-Zentrum SKZ, Würzburg, 2006
- [Fis00] Fischer, P.: *Chance für einen Technologiesprung – Modernisierung von Extrudern und Blasfolienanlagen*, *Plastverarbeiter* 51. Jahrg., 2000, Nr. 5 S. 58-60,
- [Fis01] Fischer, P.: *Werkzeuge für Mehrschichtrohre – Auslegung von Wendelverteilern*, *Kunststoffe*, Carl Hanser Verlag München, Jahrg. 91, Nr. 8, 2001, S. 142-145
- [FiW98] Fischer, P., Wortberg, J.: *Ideen mit Zukunft - Neue Wendelverteilerwerkzeuge*, erweiterte Fassung eines Beitrages zur SKZ-Fachtagung „Neuigkeiten in der Extrusion“, Würzburg, 1998
- [FrC04] Fritz, H.-G., Cretu, M.: *Auslegungskonzept für Radialwendelverteilsysteme*, *Kunststoffe* 94 (6), Hanser Verlag München, 2004, S. 84-88
- [GHK06] Gausemeier, J., Hahn, A., Kespohl, H. D., Seifert, L.: *Vernetzte Produktentwicklung – Der erfolgreiche Weg zum Global Engineering Network*, Carl Hanser Verlag München Wien, 2006, ISBN-13 978-3-446-22725-5
- [Gie94] Giesekus, H.: *Phänomenologische Rheologie – Eine Einführung*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1994, ISBN 3-540-57513-8
- [GiT99] Gigerenzer, G., Todd, P. M.: *Simple Heuristics that make us Smart*, New York, Oxford University Press, S. 119-140, 1999

- [GKK04] Gerdes, I., Klawonn, F., Kruse, R.: *Evolutionäre Algorithmen – Genetische Algorithmen, Strategien und Optimierungsverfahren, Beispielanwendungen*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2004, ISBN 3-528-05570-7
- [Haf11] Hafner, C.: *Numerische Optimierung – Optimierung für Ingenieure*, Vorlesungsskriptum, ETH Zürich, 2011, <http://alphard.ethz.ch/Hafner/Vorles/Optim/Opt.htm>
- [Hen97] Hensen, F.: *Plastics Extrusion Technology*, 2. Auflage, Hanser Verlag München Wien, 1997, ISBN 978-1569-9022-57
- [HiK03] Higuchi, H., Koyama, K.: *Flow Analyses in a Spiral Mandrel Die Assuming Wall Slip*, Polymer Processing Society, PPS, 2003, Vol. 18, S. 349-355, ISBN 0930-777x
- [Hua98] Huang, C., C.: *A Systematic Approach for the Design of a Spiral Mandrel Die*, Polymer Engineering and Science, April 1998, Vol. 38, N. 4, S. 574-582
- [JaS04] Jarre, F., Stoer, J.: *Optimierung*, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004, ISBN 3-540-43575-1
- [Joh04] Johannaber, F.: *Kunststoff Maschinenführer*, Fachbuch, Hanser Verlag, Kapitel 1.3, 2004, ISBN 3-446-22042-9
- [Kal01] Kalyanmov, D.: *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, 1. Auflage, Wiley, 2001, ISBN-13: 978-0471873396
- [Kau04] Kaul, S.: *Rechnergestützte Optimierungsstrategien für Profil Extrusionswerkzeuge*, Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2004, ISBN 3-86130-492-9
- [KDJ11] Koopmans, R., den Doelder, J., Jaap, M.: *Polymer Melt Fracture*, CRC Press, Tylor & Francis Group, 2011, ISBN 978-1-57444-780-4

- [KDL08a] Köhler, P., Danjou, S.; Lupa, N.: Approach for Automated Product Modeling Using Knowledge-Based Design Features. Computer-Aided Design & Applications, Vol. 5, No. 5, 2008, pp 622-629
- [KDL08b] Köhler, P., Danjou, S.; Lupa, N.: Feature-basierende Produktmodellierung zur Sicherung des Wissenstransfers. CAD-CAM Report, Nr.2, 2008, S. 50-54
- [KDL08c] Köhler, P., Danjou, S. Lupa, N.: Approach for a Modular Knowledge-Based CAD Modeling Process. Proceedings of the 18th CIRP Design Conference, University of Twente, Enschede, NL, 2008
- [KHK11a] Klemme, U., Humpa, M., Köhler, P.: Das virtuelle Produktmodell als Informationsträger im numerischen Optimierungsumfeld; In: ProduktDaten Journal, Ausgabe 01, 2011
- [KHK11b] Klemme, U., Humpa, M., Köhler, P.: Effizienzsteigerung des virtuellen Produktentwicklungsprozesses durch automatisierte Modellierungsansätze im Optimierungsumfeld; In: Tagungsband 9. Kolloquium Konstruktionstechnik, 2011
- [Kno06] Knowles, J.: *ParEGO: A Hybrid Algorithm with On-Line Landscape Approximation for Expensive Multiobjective Optimization Problems*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, Volume 10, No. 1, S. 50-66
- [KoR06] Kostic, M., Reifschneider, L. G.: *Extrusion Die Design*, Encyclopedia of Chemical Processing DOI: 10.1081 / E-ECHP-1200-39324, S. 633-649, 2006, ISBN 0-8247-5499-9
- [Kos10] Kosmol, P.: *Optimierung und Approximation*, 2. Auflage, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG Berlin/New York, 2010, ISBN 978-3-11-021815-2

- [Lan03] Langecker, G. R.: *Berechnung von Wendelverteiler-Werkzeugen für die Rohrextrusion mit Hilfe der Methode der finiten Elemente (Teil 1 + 2)*, Aktuelle Kurzberichte zum 30-jährigen Bestehen des Institutes für Kunststoffverarbeitung an der Montanuniversität Leoben, (S. 26 – 31), 2003
- [Lec09] Lecheler, S.: *Numerische Strömungsberechnung – Schneller Einstieg durch ausführliche praxisrelevante Beispiele*, Vieweg + Teubner, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009, ISBN 978-3-8348-0439-6
- [LiS98] Limper, A., Stieglitz, H.: *Recent Research on Mathematical Design of Spiral Mandrel Dies*, Society of Plastics Engineers, SPE, Antec 1998, S. 309-313
- [LiS02] Limper, A., Stieglitz, H.: *Berechnungsmodell bestätigt – Werkzeugauslegung für die Rohr- und Plattenextrusion*, KU Kunststoffe, Carl Hanser Verlag München, Jahrg. 92, 2002, Nr. 10, S. 161-165
- [LSP09] Lebaal, N., Schmidt, F., Puissant, S., Schläfli, D.: *Design of Optimal Extrusion Die for a Range of Different Materials*, Polymer Engineering and Science, DOI 10.1002, 2009, S. 432-440
- [Lup09] Lupa, N.: *Einsatz wissensbasierter Features für die automatische Konfiguration von Produktkomponenten*, Dissertation, 2009, Cuvillier Verlag Göttingen, ISBN 978-3-86955-192-0
- [LWS06] Limper, A., Wefelmeier, C., J., Seibel, S.: *Simulation von Extrusionswerkzeugen*, Kunststoffe, Carl Hanser Verlag München, Nr. 2, 2006, S. 104-109
- [Mar06] Martens, S.: *Simulierte Strömung – Reduzierung der Einfahrkosten beim Extrudieren*, Plastverarbeiter, Februar 2006, S.28-29
- [MBS07] Michaeli, W., Blömer, P., Scharf, M.: *Radialwendelverteiler rheologisch und mechanisch auslegen*, Kunststoffe 97, Hanser Verlag München, 2007, S. 54-57



- [MeL06] Metwally, H., M., London, M.: *Die Balancing: Coupling Flow Simulation, Shape Deformation & Optimization*, Society of Plastics Engineers, SPE, Antec 2006, S. 835-839
- [MGF08] Malakzadeh, M., Goharpey, F., Foudazi, R.: *“Flow Analysis of Flat Spiral Dies and Comparison with Cylindrical Spiral Mandrel Dies”*, Polymer Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Carl Hanser Verlag München, International Polymer Processing XXIII (2008)
- [MHM02] Menges, G., Haberstroh, E., Michaeli, W., Schmachtenberg, E.: *Werkstoffkunde Kunststoffe*, 5. Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien, 2002, ISBN-13-978-3-446-21257-2
- [MiB04a] Michaeli, W., Blömer, P.: *Flat Spiral Dies – Rheological Design with Network Theory*, Journal of Polymer Engineering, Vol. 24, Nos. 1-3, 2004, S. 137-153
- [MiB04b] Michaeli, W., Blömer, P.: *Analysis of Flow in Spiral Mandrel Die*, Society of Plastics Engineers, SPE, Antec 2004, s. 272-276
- [MiB09] Michaeli, W., Behr, M., u. a.: *Profilwerkzeuge automatisch optimieren*, Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, Nr. 7, 2009, S. 45-48
- [Mic03] Michaeli, W.: *Extrusionswerkzeuge für Kunststoffe und Kautschuk: Bauarten, Gestaltung und Berechnungsmöglichkeiten*, 3. völlig überarbeitete und erweiterte Auflage – München; Wien: Hanser 2009, ISBN 978-3-446-42026-7
- [Mic06] Michaeli, W.: *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*, 5. überarbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien, 2006, ISBN 3-446-40580-1
- [Mic09] Michels, R.: *What’s the best for you in Pipe Dies: Helix or Spiral*, Modern Plastics, World Encyclopedia, 2009, Plasticstoday, S. 44-45
- [MiK04] Michaeli, W., Kaul, S.: *Approach of an Automatic Extrusion Die optimization*, Journal of Polymer Engineering 24 (2004), S. 123-136, 2004

- [MKF05] Michaeli, W., Kaul, S., Fink, B.: *Automatische Optimierung von Fließkanalgeometrien*, Extrusion (2005) 4, S. 22-24
- [MMB84] Menges, G., Mayer, A., Bartilla, T., Wortberg, J.: *Auslegung von Wendelverteilerwerkzeugen*, Kunststoffe, Hanser Verlag München, 1984, S. 11-16
- [MMW89] Masberg, U., Michaeli, W., Wortberg, J.: *Berechnung von Strömungen und verfahrenstechnische Auslegung von Extrusionswerkzeugen*, Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik – Teil 1, Carl Hanser Verlag München, 1989
- [MSB07] Michaeli, W., Schmitz, T., Baranowski, T., Fink, B.-K.: *Automatic Optimisation of Extrusion Dies*, Polymer Processing Society, PPS, 2007, S. 1-4
- [Nie06] Niemeier, H.: *Analyse und Optimierung wandnaher Schmelzeströmungen in Extrusionswerkzeugen für die Kunststoffverarbeitung*, Dissertation an der Universität Duisburg-Essen, 2006, ISBN 3-8322-5385-8
- [NoR01] Noriega, M., Rauwendaal, C.: *Troubleshooting the Extrusion Process*, Hanser Verlag München Wien, 2001, ISBN 978-1569-9032-09
- [OBD09] Oertel, H., Böhle, M., Dohrmann, U.: *Strömungsmechanik – Grundlagen, Grundgleichungen, Lösungsmethoden, Softwarebeispiele*, 5. Auflage, Vieweg + Teubner, GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2009, ISBN 978-3-8348-0483-9
- [Pas04] Paschedag, A. R.: *CFD in der Verfahrenstechnik – Allgemeine Grundlagen und mehrphasige Anwendungen*, 1. Auflage, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2004, ISBN 978-3527-3099-48
- [PBF07] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.-H.: *Konstruktionslehre – Grundlagen*, 7. Auflage, Springer Verlag, ISBN-13 978-3-540-34060-7
- [Pro72] Procter, B.: *Flow Analysis in Extrusion Dies*, Society of Plastics Engineers, SPE, Antec 1972, Vol. 98, S. 34-41

- [PVS05] Perdikoulis, J., Vicek, J., Svabik, J.: *Application of 3D FEM Flow Simulation towards Blown Film Die Optimization*, TAPPI Place Conference, September, 2005
- [PVV89] Perdikoulis, J., Vlcek, J., Vlachopoulos, J.: *Predicting Flow Performance of Spiral Mandrel Dies*, Journal of Plastic Film and Sheeting, 1989 (5), S. 18-31
- [Rau87] Rauwendaal, C.: *Flow Distribution in Spiral Mandrel Dies*, Raychem Corporation Menlo Park, California; Polymer Engineering and Science, Mid-February, 1987, Vol. 27, No.3
- [Rau01] Rauwendaal, C.: *Polymer Extrusion*, Hanser Verlag München Wien 2001, ISBN 978-1569-9032-16
- [Rot02] Rotter, B. A.: *Rheologische und mechanische Auslegung von Radialverteilerwerkzeugen*, Dissertation, 2002, ISBN-13 978-3896539618
- [SaA84] Saillard, P., Agassant, J. F.: *Flow Distribution in Spiral Mandrel Dies*, Society of Plastics Engineers, SPE, Antec 1986, S. 917-923
- [Sch05] Schumacher, A.: *Optimierung mechanischer Strukturen – Grundlagen und industrielle Anwendungen*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005, ISBN 3-540-21887-4
- [Sch09] Schallehn, E.: *Grundlagen der Computergrafik – Geometrische Modellierung*, Vorlesungsskript OvG Universität Magdeburg, Fakultät für Informatik, Institut für Technische und Betriebliche Informationssysteme, [http://www.witi.cs.uni-magdeburg.de/iti\\_db/lehre/gif/gif\\_1.pdf](http://www.witi.cs.uni-magdeburg.de/iti_db/lehre/gif/gif_1.pdf) - ...gif36.pdf
- [Sei05] Seibel, S.: *Vielfalt am laufenden Meter*, Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, Nr. 12, 2005, S. 38-46
- [Sei06] Seibel, S.: *Konzeptionelle Aspekte bei der Gestaltung und Auslegung von Extrusionswerkzeugen*, Dissertation, Shaker Verlag GmbH, 2007, ISBN 978-3-8322-6552-6

- [Sie09] Siegloch, H.: *Technische Fluidmechanik*, 7. Auflage, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2009, ISBN 978-3-642-03089-5
- [SKK07] Schade, H., Kunz, E., Kameier F., Paschereit, C. O.: *Strömungslehre*, 3. Auflage, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin, 2007, ISBN 978-3-11-018972-8
- [SpA06] Spurk, J. H., Aksel, N.: *Strömungslehre – Einführung in die Theorie der Strömungen*, 6. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2006, ISBN 3-540-26293-8
- [SpW00] Spirgatis, J., Wortberg, J.: *Blasfolienextrusion heute – Vielseitigkeit und Flexibilität sind gefragt*, KU Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, Jahrg. 90 (2000), Nr. 10, S. 108-114
- [SSP03] Skabrahova, P., Svabik, J., Perdikoulis, J.: *A Non-isothermal 3D FEM Study of Spiral Mandrel Dies with non-Symmetrical Input*, Society of Plastics Engineers, SPE; Antec 2003, S. 305-309
- [Sti02] Stieglitz, H.: *Rohre aus einem Guss – Auslegungskriterien für Wendelverteiler*; KU Kunststoffe, Jahrg. 92 (2002) 8, Carl Hanser Verlag, München; S.38 ff.
- [Sto96] Storn, R.: *On the usage of differential evolution for function optimization*, Biennial Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS), S. 519-523, 1996
- [Stö07] Stöcker, M.: *Untersuchung von Optimierungsverfahren für rechenzeitaufwändige technische Anwendungen in der Motorenentwicklung*, Diplomarbeit, Fakultät für Mathematik der Technischen Universität Chemnitz, 2007, <http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/5476/data/diplomarbeit.pdf>
- [StP97] Storn, R., Price, K.: *Differential Evolution – a simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces*, Journal of Global Optimization 11, 1997, S. 341-359

- [StP05] Storn, R., Price, K.: *Differential Evolution – A Practical Approach to Global Optimization*, Springer Verlag, 2005, ISBN 978-3-540-20950-8
- [SuG04] Sun, Y., Gupta, M.: *Effect of Elongational Viscosity on the Flow in a Spiral Mandrel Die*, Society of Plastics Engineers, SPE, Antec 2004, S. 86-90
- [UnD10] Unger, T., Dempe, S.: *Lineare Optimierung – Modell, Lösung, Anwendung*, Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2010, ISBN 978-3-8351-0139-5
- [VDI2221] Richtlinie des Verein Deutscher Ingenieure: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*, VDI 2221, Mai 1993 aus dem VDI Handbuch Konstruktion
- [VKK84] Vlcek, J., Kral, V., Kouba, K.: *The Calculation of the Form of a Spiral Mandrel*, Plastics and Rubber Processing and Applications, Nr. 4, 1984, S. 309-315
- [Vla10] Vlachopolous, J.: *Romancing the Rheological Design of Extrusion Dies*, Polymer Processing Society, PPS, Banff, Canada, 2010
- [VVP88] Vlcek, J., Vlachopoulos, J., Perdikoulis, J.: *Determination of Output Uniformity from Spiral Mandrel Dies*, International Polymer Processing, 2 (3/4), 1988, S. 174-181
- [Wei09] Weise, T.: *Global Optimization Algorithms – Theory and Application*, eBook, publiziert von Thomas Weise, 2009, [www.it-weise.de](http://www.it-weise.de)
- [WhP03] White, J., Potente, H.: *Screw Extrusion*, Hanser Verlag München Wien, 2003, ISBN 978-1569-9031-79
- [WiF86] Winter, H. H., Fritz, H. G.: *Design of Dies for the Extrusion of Sheets and Annular Parisons: The Distribution Problem*, Polymeer Engineering and Science, April 1986, Volume 26. Number 8, S. 543 – 553, 1986

- [WiL03a] Wieczorek, A., Langecker, G.: *Berechnen von Wendelverteilerwerkzeugen*, Kunststoffe Nr. 4, Carl Hanser Verlag, München, 2003, S. 44-48
- [WiL03b] Wieczorek, A., Langecker, G.: *Gleichmäßiger Massenstrom aus dem Wendelverteiler*, Kunststoffe Nr. 7, Carl Hanser Verlag, München, 2003, S. 76-78
- [WJM77] Wortberg, J., Junk, P. B., Menges, G.: *Calculation of the Elastic Deformation (swelling potential) in Extrusion Dies – Hints on Die Design*, Society of Plastics Engineers, SPE, Antec 1977, S. 434-437
- [WNR04] Wortberg, J., Niemeier, H., Rivera Sanchez, E.: *Automatic Residence Time Optimization of 90° Elbows in Extrusion Dies*, Polymer Processing Society, PPS, 2004
- [Woh05] Wohlers, W.: *Mehrstufige Optimierung komplexer Strukturmechanischer Probleme*, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2005, ISBN 3-86537-479-4
- [WoM77] Wortberg, J., Menges, G.: *More information for extrusion die design and processing – From melt-flow-index to General Viscosity Function*, Society of Plastics Engineers, SPE; Antec 1977, S. 426-429
- [Wor78] Wortberg, J.: *Werkzeugauslegung für Ein- und Mehrschichtextrusion*, Dissertation, RWTH Aachen, 1978
- [Wor95] Wortberg, J.: *Design of Spiral Mandrel Coextrusion Heads for Blow Molding*, Society of Plastics Engineers, SPE, Antec 1995, S. 936-942
- [WoS82] Wortberg, J., Schmitz, K.-P.: *Auslegung und Optimierung von Wendelverteilerwerkzeugen*, Kunststoffe 72 (4), Hanser Verlag München, 1982, S. 198-205
- [WVK11] Wirtschaftsvereinigung Kunststoff: *Konjunkturbericht der deutschen Kunststoffindustrie 2011*, Stand 01. Februar 2011, erhältlich über Vereinspräsenz (nicht e. V.): [www.wv-kunststoff.org](http://www.wv-kunststoff.org), Tag des Zugriffs: 01.05.2011

- [ZTP01] Zatloukal, M., Tzoganakis, C., Perdikoulis, J., Saha, P.: *Numerical Simulation of Polymer Flow in Flat Spiral Dies*, Polymer Engineering and Science, October 2001, Vol. 41, No. 10, S. 1683-1694

Eigene Publikationen:

**2011**

- [2011a] Wortberg, J., Saul, K.: *Potentials of Energy-Efficiency in Film-Extrusion*, Packaging Films, Ausgabe Frühjahr, 2011
- [2011b] Wortberg, J., Saul, K., Köhler, P., Klemme, U.: *Die Quality Criteria for fully Automized Optimization of Melt Distribution Systems*, Proceedings of Polymer Processing Society 27<sup>th</sup>, PPS, Marrakesch, Marokko, 2011
- [2011c] Wortberg, J., Saul, K. Janas, M.: *Simulation in der Extrusionstechnik*, Kunststoffe + Simulation, Fachtagung Hanser Verlag, München, 2011
- [2011d] Wortberg, J., Saul, K., Szöke, L.: *Produktwechseloptimierte Extrusionswerkzeuge durch angewandte Strömungssimulation*, VDI-Wissensforum - Blasformen, Baden-Baden, 2011, ISBN 978-3-18-234318-9

**2010**

- [2010a] Wortberg, J., Saul, K.: *Energy Efficiency in Polymer Processing*, Japan-Tag, K-Messe Düsseldorf, Oktober, 2010
- [2010b] Wortberg, J., Saul, K.: *Improved Performance and Product Quality by Automated Geometry Optimization of Extrusion Dies*, Proceedings of Polymer Processing Society 26<sup>th</sup>, PPS, Canada, Banff, 2010
- [2010c] Burmann, G., Saul K.: *Werkzeugtechnik in der Extrusion – Auswahl, Auslegung und Optimierung von Schmelzeverteilsystemen*, 6. Duisburger Extrusionstagung, 2010

**2010**

- [2010d] Wortberg, J., Saul, K., Kruppa, S.: *Energieeffizienz in der Extrusion – Messung, Analyse und Bewertung der Anlagenenergieeffizienz*, Plastverarbeiter – Januar 2010, S. 26-28, 2010
- [2010e] Wortberg, J., Saul, K.: *Potentiale zur Effizienzsteigerung in der Extrusion*, Niedersächsisches Forum Kunststofftechnik, Hannover, 2009

**2009**

- [2009a] Wortberg, J., Saul, K., Köhler, P., Lupa, N.: *Automatisierte Optimierung von Strömungskanälen zur Verbesserung des Spülverhaltens von Kunststoff-Extrusionswerkzeugen*, Zeitschrift Kunststofftechnik, Journal of Plastics Technology 5 (2009) 2, Ausgabe März/April 2009, Carl Hanser Verlag, S. 130 – 153, 2009
- [2009b] Wortberg, J., Köhler, P., Saul, K., Lupa, N.: *Increasing the Efficiency of Extrusion Purge Processes by Numeric Optimization*, Proceedings of Polymer Processing Society 25<sup>th</sup>, PPS, Goa, Indien, S. 173, 2009

**2008**

- [2008a] Wortberg, J., Köhler, P., Saul, K., Lupa, N.: *Integrative Interconnection of Design, Calculation and Simulation for Dimensioning a Flow Channel in Polymer Processing*, Proceedings of Polymer Processing Society 24<sup>th</sup>, PPS, Salerno, Italien, S. II. 142, ISBN 88-7897-024-7, 2008



**Abschlussarbeiten am *ipe* (nicht öffentlich zugänglich)**

- [ipe01] Knickenberg, T: *Simulation der Strömungsvorgänge in Wendelverteiler-Extrusionswerkzeugen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode*, Diplomarbeit, 2001
- [ipe02] Gorczyca, P.: *Simulation und Berechnung neuartiger Wendelverteilsysteme – Entwicklung eines praxisgerechten Lösungsalgorithmus*, Diplomarbeit, 2004
- [ipe03] Müller, C.: *Einfluss von Temperatur- und Massedurchsatzvariation auf den Spülprozess bei der Blasfolienextrusion*, Studienarbeit, 2005
- [ipe04] Sanchez, E. R.: *Numerische Strömungssimulation eines neuartigen Wendelverteilerwerkzeugs für die Blasfolienextrusion*, Bachelorarbeit, 2005
- [ipe05] Juretzka, P.: *Alternative Methoden zur wissensbasierten Modellierung von Werkzeugen für die Kunststoffverarbeitung*, Diplomarbeit, 2010 \*\*
- [ipe06] Ketteler, C.: *Numerische Simulation der Strömungsvorgänge innerhalb eines Circularverteilers mit dem Ziel der Geometrieoptimierung*, Studienarbeit, 2010 \*
- [ipe07] te Heesen, O.: *CFD-unterstützte Produktentwicklung eines Schmelzeverteilkonzeptes auf Basis der Definition und Verifizierung eines Werkzeug-Qualitätskriteriums*, Diplomarbeit, 2010 \*
- [ipe08] Brockhaus, S.: *Implementierung einer Automatisierungsmethodik zur CFD-gestützten Optimierung von Extrusionswerkzeugen*, Bachelorarbeit, 2011 \*

\* angefertigt unter Betreuung durch K. Saul

\*\* angefertigt im Rahmen des Projektes

## 7. Eingesetzte Hard- und Software

### Hardware:

Typ: Okto-Core-Workstation  
CPU: 2 x Intel® XEON® Quad Core E5450 @ 3.00 GHz @ ASUS DSEB  
System: Microsoft Windows XP Professional x64 Edition  
Version 2003 Service Pack 2  
Speicher: 24GB DDR 3

### Software:

Typ: 3D-CAD-System  
Hersteller: Dassault Systemes Societe Anonyme  
System: Solid Works 2009 SP 5.1  
Version: x64

Typ: CFD-System  
Hersteller: Dassault Systemes Societe Anonyme  
System: Flow Simulation 2009  
Version: x64

Typ: 3D-CAD-System  
Hersteller: Dassault Systemes Societe Anonyme  
System: CATIA V5 R18  
Version: x64

Typ: CFD-System  
Hersteller: ANSYS Corporation  
System: Fluent for Catia V5 R18 5.0.36  
Version: x64

Typ: CFD  
Hersteller: ANSYS Corporation  
System: Fluent R12.1.4  
Version: x64

Typ: Optimierungssystem  
Hersteller: noEsis Solutions  
System: Optimus Rev 8 SL1  
Version: x64

Typ: Tabellenkalkulation  
Hersteller: Microsoft Corporation  
System: Excel 2010  
Version: x64



## **8. Curriculum Vitae**

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.